Русское изданіе „Библіотеки Гешенъ"

Фр. Бартъ

ПАРОВЫЯ МАШИНЫ

Часть I

Термодинамическія и паро-техническія основныя положенія

Съ 64 фигурами



Библіотека „Наука и Жизнь"

Типографія газеты Rigaer Tageblatt
(П. Керковіусъ), Рига, Домская пл. № 5.

Оглавленіе.

I. Введеніе.

II. Способъ работы и мощность паровой машины.

III. Водяной паръ.

IV. Совершенная машина или машина безъ потерь.

V. Дѣйствительная машина

VI. Использованіе теплоты въ дѣйствительной машинѣ.

VII. Использованіе мятаго пара.

VIII. Поршневая машина и турбина работающая мятымъ паромъ.

Томъ II разсматриваетъ конструкцію и работу паровой машины.

I. Введенiе.

1. Развитiе работы машинами.

Такъ какъ человѣкъ и животныя съ теченiемъ времени не могли удовлетворять возрастающей потребности въ двигательной силѣ, то люди оказались вынужденными черпать потребную имъ энергiю изъ неизмѣримыхъ вспомогательныхъ источниковъ природы при помощи соотвѣтствующихъ машинныхъ приспособленiй. Древнѣйшiе двигатели — это двигатели, приводимые въ движенiе водой. Только впослѣдствiи человѣкъ дошелъ до использованiя энергiи вѣтра.

Оба эти источника энергiи связаны съ условiями мѣста и колеблются въ зависимости отъ времени года, вслѣдствiе чего изобрѣтенiе во второй половинѣ 18 столѣтiя паровой машины ознаменовало собой громадный шагъ впередъ. Энергiя пара, полученная изъ угля или какого-либо другого топлива, оказывается внѣ зависимости отъ мѣста и времени года въ противоположность силѣ вѣтра и воды.

Возможность развитiя энергiи изъ теплоты получила весьма существенное дальнѣйшее развитiе съ изобрѣтенiемъ газоваго двигателя во второй половинѣ прошлаго столѣтiя.

Всѣ эти источники энергiи съ точки зрѣнiя естественныхъ наукъ представляютъ собою лишь различныя формы одной и той же силы природы — солнца, которое считается первоисточникомъ органической жизни на землѣ. Въ то время, какъ энергiя вѣтра и воды считается современными видами солнечной теплоты, наши горючiе мате-

рiалы представляютъ солнечную энергiю давно прошедшихъ миллiоновъ лѣтъ.

Для освобожденiя заключенной въ топливѣ тепловой энергiи топливо необходимо воспламенить и сжечь. Развивающаяся при этомъ теплота можетъ быть использована для производства механической работы или непосредственно, какъ въ газовыхъ двигателяхъ, или косвенно, какъ въ паровыхъ машинахъ.

Со времени открытiя закона сохраненiя энергiи Робертомъ Майэромъ въ 1842 году мы знаемъ, что для полученiя опредѣленнаго количества механической работы, нужно затратить строго опредѣленное количество энергiи. Кромѣ того Майэръ первый указалъ, что теплота и работа эквивалентны (равнозначущи) и представляютъ собою лишь разныя формы энергiи (I Основной законъ термодинамики).

На практикѣ всякое превращенiе энергiи связано съ потерями. Эти потери отчасти происходятъ вслѣдствiе неизбѣжныхъ потерь отъ тренiя, появляющихся въ каждой машинѣ, отчасти вслѣдствiе несовершенства процессовъ работы. Разсмотримъ, напр., паровую машину: въ топкѣ парового котла путемъ сжиганiя угля получается теплота, которая нагрѣваетъ воду въ котлѣ и обращаетъ ее въ паръ. Этотъ паръ, который до нѣкоторой степени играетъ роль носителя теплоты, вслѣдствiе своего давленiя двигаетъ поршень паровой машины въ ту и другую стороны, развивая такимъ образомъ механическую работу. При этомъ какъ въ котлѣ, такъ и въ машинѣ происходятъ потери. Первыя обусловливаются главнымъ образомъ лучеиспусканiемъ котла, несовершеннымъ горѣнiемъ и уходящей черезъ дымовую трубу теплотой. Потери въ паровой машинѣ обусловливаются сопротивленiемъ тренiя, обмѣномъ теплоты, но главнымъ образомъ тѣмъ, что паръ

въ такомъ же состояніи долженъ оставить паровую машину и такимъ образомъ большую часть содержавшейся въ свѣжемъ парѣ теплоты безполезно уноситъ съ собою въ атмосферу или въ конденсаторъ.

2. Понятіе о механической работѣ и энергіи.

Если какая-нибудь неизмѣнная по величинѣ и направленію механическая сила K килогр. на пути длиною l метр. преодолѣваетъ постоянное сопротивленіе, то произведенная механическая работа составляетъ $L = K \cdot l$ килогр.-метр. Если время дѣйствія этой силы будетъ z секундъ, то произведенная въ единицу времени работа составляетъ

$$E = \frac{L}{z} = \frac{K \cdot l}{z} \text{ килогр.-метр.}$$

въ секунду и называется механическимъ эффектомъ или мощностью. Если въ секунду производится работа, равная 75 килогр.-метр., то она соотвѣтствуетъ одной лошадиной силѣ. Но эта мощность далеко превышаетъ ту, которую лошадь въ состояніи развивать продолжительное время.

Если мы въ приведенномъ примѣрѣ развиваемую силой K мощность вычислимъ въ лошадиныхъ силахъ, то получимъ

$$N = \frac{K \cdot l}{75 \cdot z} \text{ л. с.}$$

Обыкновенно принято мощность двигателей выражать въ лошадиныхъ силахъ, такъ какъ килогр.-метръ оказывается слишкомъ малой единицей для встрѣчающихся въ техникѣ мощностей.

Энергіей мы называемъ накопленную работу или способность какого нибудь тѣла производить работу. Но

обыкновенно не дѣлаютъ различія между энергіей и работой, и даже энергія и работа измѣряются одной и той же единицей. Если, напр., энергія встрѣчается въ видѣ механической, тепловой или электрической, то она и измѣряется соотвѣтственными механическими, тепловыми и электрическими единицами.

3. Единица массы.

Технической единицей силы служатъ килограмъ (kg), длины — метръ, а времени — секунда. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ эти единицы оказываются слишкомъ малыми, поэтому за единицы тогда принимаютъ кратныя ихъ.

Такъ какъ за единицу объема принятъ кубическій метръ, то подъ удѣльнымъ вѣсомъ γ разумѣютъ вѣсъ куб. метра даннаго тѣла въ килогр.; подъ удѣльнымъ объемомъ v газа или пара разумѣютъ объемъ, занятый 1 килогр. его.

Практическая единица давленія на плоскость p — атмосфера (at), т. е. давленіе 1 килогр. на квад. сантим.; однако въ характеристическихъ уравненіяхъ считаютъ давленіе P въ килогр. на квадр. метръ плоскости. Иногда давленіе газа или пара измѣряютъ въ милиметрахъ ртутнаго столба (QS), при чемъ 1 at = 1 килогр. на квадр. сантим. = 735,5 мм. ртутнаго столба при 0° C.; нормальная высота барометра соотвѣтствуетъ 760 мм. ртутнаго столба при 0° C.

Въ зависимости отъ того, исходятъ ли при вычисленіи давленія пара или газа отъ абсолютной пустоты или отъ атмосфернаго давленія, получаютъ его абсолютное (абсолютн. атм.) или манометрическое давленіе, т. е. давленіе надъ атмосфернымъ. Абсолютное давленіе получаютъ, если къ манометрич. давленію прибавить суще-

ствующее давленіе атмосферы. Когда говорятъ о давленіи пара, то слѣдуетъ подразумѣвать давленіе манометрическое.

Въ техникѣ за единицу механической энергіи или энергіи движенія принята лошадиная сила-часъ. Если какая нибудь машина втеченіе часа развиваетъ мощность въ 1 лош. с., то имѣемъ работу 1 лошад.-сила-часъ.

Въ настоящее время лошад. сила является общеупотребительной мѣрой мощности, при чемъ слѣдуетъ указать, что между нѣмецкой лошад. силой = 75 килогр. метр. въ сек. и англійской лошад. силой = 550 англійск. футо-фунтамъ въ секунду существуетъ небольшая разница, а именно

1 лош. сила нѣмецк. = 0,98633 англійск. лош. сил.

1 лош. сила англійск. = 1,01386 нѣмецк. лош. сил.

Въ механической теоріи теплоты за единицу механической работы принятъ килогр.-метръ. Зависимость между лош. силой-часъ и килогр.-метромъ составляетъ

1 лош. сила-часъ $= 75 \cdot 60 \cdot 60 = 270{,}000$ килогр.-метр.

Теплота измѣряется по интенсивности и количеству теплоты. Для измѣренія интенсивности или температуры пользуются термометромъ, количество же тепла измѣряется при помощи калориметра.

Обыкновенно температура измѣряется въ градусахъ Цельзія; въ термодинамикѣ же большею частью считаются съ абсолютной температурой. Если мы послѣднюю обозначимъ черезъ T, а первую черезъ t, то между ними существуетъ зависимость $T = 273 + t$.

Единицей количества теплоты или тепловой энергіи служитъ килограммъ-калорій; подъ нею слѣдуетъ подразумѣвать такое количество теплоты, какое необходимо затратить для повышенія температуры 1 килогр. воды на

1 С. Первый, который опредѣлилъ отношеніе между тепловой и механической энергіей, былъ Робертъ Майеръ (1842 г.). По новѣйшимъ наблюденіямъ можно принять

1 калорія = 427 килогр.-метръ

1 килогр.-метр. = $\frac{1}{427}$ калор. (мех. эквив. тепла)

или 1 лошад. сила = 632,3 калор.

Дла опредѣленія содержанія теплоты какого-нибудь тѣла необходимо кромѣ температуры и вѣса его знать еще его теплоемкость c.

Подъ послѣдней слѣдуетъ понимать то количество теплоты въ калоріяхъ, какое необходимо для нагрѣванія 1 килогр. даннаго тѣла на 1° С. Большею частью теплоемкость „c“ обусловливается температурой тѣла.

Электрическая мощность измѣряется уаттами, произведеніемъ силы тока въ амперахъ на напряженіе въ вольтахъ. Для измѣренія большой мощности за единицу мѣры принимается килоуаттъ. Между механической и электрической энергіей существуетъ соотношеніе:

1 лош. сила = 736 уаттъ-часовъ,

1 килоуаттъ-час. = 1,3592 лош. сил.-час.

4. Перечень важнѣйшихъ буквенныхъ значеній.

Если прямо не указано иначе, то обозначаютъ:

$A = \frac{1}{427}$ механич. эквивалентъ теплоты,

v объемъ 1 килогр. нара въ куб. м. или иногда удѣльный объемъ; въ частномъ случаѣ

$v' = 0{,}001$ куб. м. удѣльный объемъ воды

$v'' =$ удѣльный объемъ сухого насыщеннаго пара

p давленіе пара въ атмосферахъ (килогр. на кв. метр.); въ частности,

p_e давленіе въ концѣ расширенія,
p_1 противодавленіе въ цилиндрѣ при выпускѣ,
p' давленіе при выпускѣ или давленіе въ пароотводной трубѣ сейчасъ за цилиндромъ,
p_c давленіе въ концѣ сжатія,
p_i среднее индикаторное давленіе,

P давленіе пара въ килогр. на квадр. сантим.,
t температуру въ ° Цельзія,
$T = 273 + t$ абсолютную температуру,
$\gamma = \frac{1}{v}$ удѣльный вѣсъ или вѣсъ въ килогр. куб. метра

γ'' удѣльный вѣсъ сухого насыщеннаго пара,

i содержаніе теплоты или общее количество теплоты въ калоріяхъ въ одномъ килогр. пара; въ частности

i' теплота жидкости,
i'' теплота сухого насыщеннаго пара,

$r = i'' - i'$ теплота парообразованія, калор. въ 1 килогр.
$\rho = r - AP(v'' - v')$ — внутренняя теплота парообразованія, калорій въ 1 килогр.,
$u = i - AP(v' - v')$ — энергія пара; калорій на 1 килогр. въ частности:

u' — энергія жидкости,
u'' — энергія сухого насыщеннаго пара,

s энтропія; въ частности:

s' энтропія жидкости,
s'' энтропія сухого насыщеннаго пара,

x относительное количество пара въ 1 килогр. смѣси,
$1 - x$ влажность пара,
c_p теплоемкость при постоянномъ давленіи,
R постоянная для газовъ,
D расходъ пара въ килогр. на лошад. силу-часъ; въ частности:

D_0 расходъ пара въ машинахъ безъ потерь,
D_i расходъ пара на индик. лош. силу-часъ,
D_e расходъ пара на дѣйствит. лош. силу-часъ,

G общій расходъ пара въ килогр.,

L произведенную работу въ килогр.-метр., въ частности:
L_0 работа машины безъ потерь,
L_i индикаторная работа на поршнѣ,
L_e полезная работа (на оси вала),

N мощность машины въ лош. силахъ; въ частности:
N_0 мощность машины безъ потерь,
N_i индикаторная мощность,
N_e полезная мощность,

H адіабатическое паденіе тепла въ калоріяхъ т. е. тепловое значеніе работы 1 килогр. пара въ машинѣ безъ потерь,

$\eta_0 = \frac{H}{i}$ термическій коэф. полезнаго дѣйствія машины безъ потерь,

$\eta_{th} = \frac{632,3}{D_i \cdot i}$ термическій коэф. полезнаго дѣйствія дѣйствительной машины,

$\eta_g = \frac{N_i}{N_0} = \frac{632,3}{D_i \cdot H}$ термическій коэф. полезнаго дѣйствія по отношенію къ индикаторн. мощности или индикат. коэф. полез. дѣйствія,

$\eta_g = \frac{N_e}{N_0} = \frac{632,3}{D_e \cdot N}$ эффективную степень полноты,

$\eta_m = \frac{N_e}{N_i}$ механ. коэф. полезнаго дѣйствія,

$\eta_e = \frac{632,3}{D_e \cdot i}$ эффектив. термич. коэф. полез. дѣйствія,

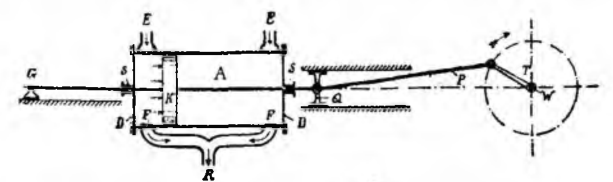
η_c коэф. полез. дѣйствія трубопроводовъ,

η_k коэф. полез. дѣйствія котельнаго устройства,
η_w общій или экономическій коэф. полез. дѣйствія машины и котельнаго устройства.

II. Способъ работы и мощность паровой машины.

5. Сущность паровой машины.

Дѣйствіе обыкновенной одноцилиндровой паровой машины выясняется изъ слѣдующаго схематическаго изо-



Фиг. 1. Схематическое изображеніе паровой машины.

браженія (фиг. 1): Поступающій изъ котла или перегрѣвателя свѣжій или перегрѣтый паръ поступаетъ при E въ рабочій цилиндръ A и, благодаря своему давленію, двигаетъ поршень K по направленію стрѣлки вправо. Работа, воспринятая поршнемъ при помощи поршневого штока, передается кривошипному механизму, задача котораго состоитъ въ преобразованіи перемѣнно-поступательнаго движенія поршня во вращательное. Составныя части кривошипнаго механизма составляютъ: крейцкопфъ Q съ его направляющей, шатунъ P, кривошипъ T и главный или коренной валъ W.

Притокъ свѣжаго пара происходитъ только втеченіе части хода поршня*); во время же остальной части

*) Ср. выводы относительно машинъ безъ расширенія въ гл. 25.

хода поршня происходитъ расширеніе пара, при чемъ производимое на поршень давленіе уменьшается соотвѣтственно постепенному пониженію давленія пара.

Лишь только поршень достигаетъ своего крайняго праваго положенія (мертвой точки), онъ начинаетъ возвращаться назадъ.

Во время обратнаго хода поршня расширившійся паръ выталкивается черезъ пароотводной органъ F въ пароотводный трубопроводъ R, откуда онъ уходитъ въ атмосферу (машина безъ конденсаціи) или въ конденсаторъ (машина съ охлажденіемъ).

Дла полученія спокойнаго хода машины необходимо трекращать выпускъ пара предварительнымъ закрытіемъ пароотводнаго органа F. Остающійся въ цилиндрѣ паръ вслѣдствіе этого сжимается и служитъ тогда эластичнымъ буферомъ.

Въ то время, какъ съ одной стороны поршня происходитъ выпускъ пара, на другой сторонѣ его происходитъ впускъ и расширеніе пара въ описанномъ выше порядкѣ. Такимъ образомъ при каждомъ ходѣ поршня производится механическая работа.

Въ томъ мѣстѣ, гдѣ штокъ проходить черезъ крышку цилиндра D, для уплотненія имѣется сальникъ S. Въ большихъ машинахъ штокъ проходитъ сквозь обѣ крышки и поддерживается крейцкопфомъ и заднимъ ползуномъ G.

Важнѣйшей частью машины, какъ бы душой ея, является парораспредѣленіе. Сюда относятся всѣ тѣ части, которыя должны регулировать впускъ и выпускъ пара, какъ напр.: золотники, клапаны, эксцентрики и т д., а также и регуляторъ. Послѣдній имѣетъ своей цѣлью путемъ измѣненія наполненія регулировать мощность машины сообразно расходу энергіи въ каждый данный моментъ. При этомъ онъ такъ дѣйствуетъ на паровпускные

органы (на нашей схемѣ клапаны), что продолжительность ихъ открытія устанавливается сообразно требуемому наполненію. Движеніе же паровыпускныхъ клапановъ остается одинаковымъ при всѣхъ нагрузкахъ.

При большихъ мощностяхъ распредѣляютъ расширеніе пара между двумя цилиндрами - цилиндромъ высокаго давленія и цилиндромъ низкаго давленія. Выходящій изъ перваго цилиндра паръ посредствомъ особаго трубопровода (ресивера) проводится въ цилиндръ низкаго давленія, гдѣ онъ продолжаетъ расширяться. Трехкратное расширеніе для постоянныхъ установокъ въ настоящее время мало примѣняется.

Для составленія себѣ понятія о совершенствѣ паровой машины ее сравниваютъ съ машиной безъ потерь, т. е. съ идеальной машиной.

Болѣе подробно объ этомъ см. главу 19.

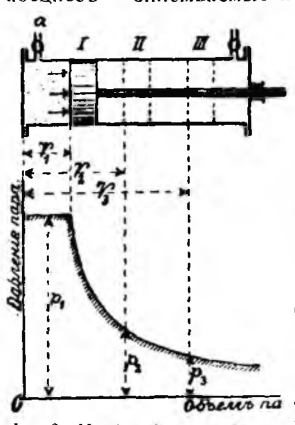
6. Индикаторная діаграмма вообще.

Для полученія нагляднаго представленія объ измѣненіяхъ давленія пара внутри парового цилиндра пользуются діаграммой объемовъ и давленій. Такъ какъ подобная діаграмма получается помощью индикатора, то ее и называютъ также индикаторной діаграммой. Въ противоположность тепловой діаграммѣ, она представляетъ собою діаграмму работы. Заключеніе о расходѣ пара въ машинѣ по индикаторной діаграммѣ не дѣлается.

На фиг. 2 изображено измѣненіе давленій по одну сторону поршня за время одного хода. При этомъ принято, что впускъ пара продолжается до положенія I поршня, послѣ чего начинается расширеніе пара, и давленіе его поэтому быстро падаетъ. Такъ, наприм., въ

положенiи поршня II давленiе будетъ p_2, а въ положенiи III оно будетъ только p_3.

Если мы въ прямоугольной координатной системѣ въ видѣ ординатъ будемъ откладывать давленiя, соотвѣтствующiя различнымъ положенiямъ поршня, а въ видѣ абсциссъ — описываемые поршнемъ объемы, то получимъ представленную на фигурѣ подъ цилиндромъ дiаграмму давленiй. Въ перiодъ наполненiя давленiе пара остается постояннымъ и равнымъ p_1. Поэтому линiя давленiя направлена горизонтально до V_1. Отсюда она начинаетъ падать соотвѣтственно расширенiю пара. Когда поршень описалъ объемъ V_2, давленiе понизилось до величины p_2; соотвѣтствующее объему V_3 давленiе будетъ p_3. Дѣйствительное направленiе кривой давленiй втеченiе одного хода поршня (прямого и обратнаго), изображается индикаторной дiаграммой (фиг. 4). Площадь дiаграммы изображаетъ работу, развиваемую паромъ съ разсматриваемой стороны поршня, на каждый квадр. сантиметръ его площади втеченiе одного оборота машины. Это есть *индикаторная работа на 1 кв. сант. площади поршня* (см. гл. 7).

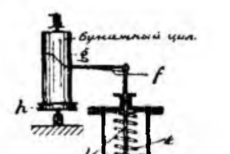


Фиг. 2. Измѣненiе давленiй пара за одинъ рабочiй ходъ поршня.

Если въ работающей машинѣ имѣется какая нибудь неисправность, стоящая въ связи съ парораспредѣленiемъ, то рекомендуется помощью индикатора снять индикаторную дiаграмму съ соотвѣтствующаго рабочаго цилиндра,

Индикаторъ представляетъ собою приборъ, который автоматически записываетъ всѣ измѣненія давленія пара въ цилиндрѣ.

На фиг. 2 индикаторъ для примѣра присоединенъ къ цилиндру въ мѣстѣ *a* и такимъ образомъ постоянно сообщается съ разсматриваемой стороной цилиндра. Весьма важно, чтобы соединительная трубка между индикаторомъ и цилиндромъ была по возможности короче, чтобы индикаторъ могъ непосредственно слѣдовать за всѣми измѣненіями давленія пара въ цилиндрѣ.

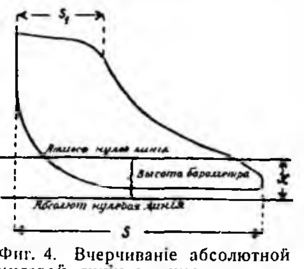


Фиг. 3. Схематическое изображеніе индикатора.

Дѣйствіе индикатора выясняется изъ схематическаго его изображенія (фиг. 3). Въ коробкѣ *b* находится плотно пригнанный поршень *c*. Путемъ открытія трехходового крана, паръ поступаетъ подъ поршень *c*, поднимаетъ его, сжимая при этомъ спиральную пружину *e* болѣе или менѣе, въ зависимости отъ давленія пара. Движеніе поршня помощью пишущаго штифта *f*, насаженнаго на конецъ штока *d* передается поворачивающемуся бумажному барабану *g*, который снабженъ шнуровымъ блокомъ *h*. Блокъ приводится въ движеніе непосредственно отъ крейцкопфа машины и такимъ образомъ, что окружность бумажнаго барабана совершаетъ движеніе, точно пропорціональное движенію поршня. Горизонтальные пути штифта на барабанѣ въ уменьшенномъ масштабѣ воспроизводятъ ходъ поршня, т е. абсциссы на полученной такимъ образомъ діаграммѣ прямо соотвѣтствуютъ путямъ поршня. Ординаты изображаютъ давленія пара. Для полученія

достаточно большого масштаба для нихъ, штифтъ *f* въ дѣйствительности не прикрѣпляютъ непосредственно къ штоку *d*, а между поршневымъ штокомъ и пишущимъ штифтомъ устанавливаютъ передаточный рычажный механизмъ.

До или послѣ снятія діаграммы слѣдуетъ еще нанести атмосферную нулевую линію, при чемъ путемъ опредѣленнаго положенія трехходового крана *i* внутренняя полость индикатора сообщается съ внѣшней атмосферой.



Фиг. 4. Вчерчиваніе абсолютной нулевой линіи въ индикаторную діаграмму.

Для полученія абсолютной нулевой линіи на разстояніи одной атмосферы или соотвѣтственно на разстояніи x, соотвѣтствующемъ данному стоянію барометра, проводятъ прямую параллельную атмосферной нулевой линіи. (фиг. 4).

Если въ разсматриваемомъ мѣстѣ высота барометра составляетъ напр. 650 мм., тогда абсолютная нулевая линія расположится ниже атмосферной на $\frac{650}{735,5} = 0,884$ килогр. на кв. сантим.

Если масштабъ пружины индикатора составляетъ напр. 3 мм, то это разстояніе соотвѣтствуетъ $x = 2,65$ мм.

Для того, чтобы индикаторъ точно воспроизводилъ давленія пара, онъ долженъ работать по возможности безъ тренія.

Движеніе штифта должно быть строго вертикально и пропорціонально измѣненіямъ давленія. Кромѣ того передача къ бумажному барабану должна быть правильно устроена.

При надлежащемъ устройствѣ индикаторъ можетъ служить для чиселъ оборотовъ до 350 въ минуту. При болѣе значительныхъ скоростяхъ инерція массъ индикаторнаго поршня и штифта отражается весьма неблагопріятно, и получаемыя тогда діаграммы теряютъ свою точность.

Для машинъ, работающихъ перегрѣтымъ паромъ, рекомендуется примѣнять индикаторы съ наружными пружинами.

При построеніи индикаторныхъ діаграммъ за абсциссы обыкновенно принимаютъ пути поршня, а не объемы, описываемые поршнемъ, какъ на фиг. 2. Въ сущности это сводится къ тому же, такъ какъ объемы пропорціональны путямъ поршня.

Если впускъ пара происходитъ въ теченіе пути поршня s_1, то отношеніе $s_1 : s$ означаетъ наполненіе.

7. Индикаторная мощность.

Подъ индикаторной мощностью подразумѣваютъ работу, передаваемую паромъ поршню паровой машины. Опредѣленіе индикаторной мощности производится помощью индикаторной діаграммы такимъ образомъ, что сначала опредѣляютъ среднее индикаторное давленіе. Подъ этимъ понимаютъ то давленіе, которое должно было-бы втеченіе всего хода дѣйствовать на поршень для развитія той же работы, какъ и при перемѣнномъ давленіи. Среднее индикаторное давленіе p_i получается путемъ опредѣленія площади индикаторной діаграммы планиметрированіемъ и раздѣленія ея на длину и на масштабъ пружины.

Среднее индикаторное давленіе на поршень тогда получается

$$K = \frac{\pi d^2}{4} \cdot p_i \text{ килогр.}$$

Здѣсь d обозначаетъ діаметръ поршня или цилиндра въ сант., какъ онъ расчитывается на основаніи средней температуры стѣнокъ (ср. гл. 34). При этомъ опредѣляютъ отверстіе цилиндра въ холодномъ состояніи и вычисляютъ линейное его расширеніе вслѣдствіе нагрѣванія при работѣ.

Если u_m означаетъ среднюю скорость поршня въ метр. въ сек., то индикаторная мощность N_i составляетъ

$$N_i = \frac{K \cdot u_m}{75} \text{ лош. с., гдѣ } u_m = \frac{2\,s \cdot n}{60},$$

s – ходъ поршня въ метрахъ, и n — число оборотовъ въ минуту.

Въ предыдущей формулѣ для N_i не принято во вниманіе уменьшеніе полезной площади поршня штокомъ или задней направляющей штангой. Въ дѣйствительности слѣдуетъ опредѣлить рабочія площади поршня съ обѣихъ сторонъ и взять ихъ среднюю ариѳметическую.

Послѣдней величиной слѣдуетъ пользоваться для опредѣленія средняго давленія на поршень.

Для машинъ многократнаго расширенія индикаторная мощность получается какъ сумма индикаторныхъ мощностей всѣхъ цилиндровъ (ср. томъ II, гл. 14).

8. Полезная мощность.

Благодаря неизбѣжнымъ потерямъ на треніе (треніе поршня о стѣнки цилиндра, треніе въ сальникѣ, подшипникахъ и т. д.) эффективная или полезная мощность N_e машины меньше индикаторной ея мощности N_i. Отношеніе $N_e : N_i$ принято называть механическимъ коэффиціентомъ пол. д. (η_m). Чѣмъ болѣе это отношеніе приближается къ единицѣ тѣмъ болѣе точно и вѣрно выполнена машина, и тѣмъ совершеннѣе ея смазка. Обыкновенно $\eta_m = 0{,}90$ 0,92. Въ маленькихъ машинахъ и въ

машинахъ, дурно изготовленныхъ или еще недостаточно приработанныхъ, коэфф. полез. д. при нѣкоторыхъ обстоятельствахъ доходитъ до 85⁰/₀ и даже ниже, между тѣмъ какъ при первоклассныхъ фабрикатахъ значенiе η_m повышается и выше 92⁰/₀.

Вышеприведенныя числовыя данныя относятся къ *нормальной мощности*. *Чѣмъ меньше нагрузка машины*, тѣмъ меньше отношенiе $N_e : N_i$. При холостомъ ходѣ это отношенiе равно нулю.

Если *никакихъ особыхъ обозначенiй не дано*, то подъ мощностью паровой машины слѣдуетъ всегда понимать полезную мощность. Если слѣдуетъ понимать индикаторную мощность, то это должно быть ясно указано [1]).

Опредѣленiе полезной мощности можетъ производиться различными путями. Самый безупречный и точный способъ состоитъ въ опредѣленiи работы при помощи тормаза. Однако этотъ способъ при большихъ машинахъ затруднителенъ *и сопряженъ съ разными опасностями*, почему и примѣняется въ исключительныхъ только случаяхъ.

Если съ паровой машиной непосредственно соединена динамо машина, то отдаваемая якоремъ динамо машины электрическая энергiя можетъ служить для опредѣленiя полезной мощности паровой машины, если извѣстенъ коэф. полез. д. якоря динамо машины при данныхъ условiяхъ температуры и *нагрузки*.

Обыкновенно для опредѣленiя полезной мощности примѣняется индикаторъ. Испытуемую машину индицируютъ разъ *при* полной нагрузкѣ и другой разъ при холостомъ ходѣ ея. Полезная мощность выражается тогда разностью между индикаторной мощностью N_i при полной

[1]) Заданiе мощности въ нормальныхъ *лошадиныхъ силахъ по* нормамъ не допустимо.

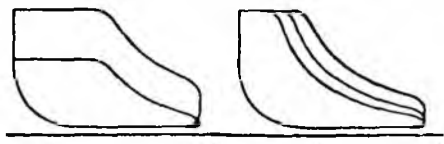
нагрузкѣ и индикаторной мощностью при холостомъ ходѣ N_l, т. е. $N_e = N_i - N_l$. При этомъ необходимо замѣтить, что при вычисленіи N_l слѣдуетъ принимать то же число оборотовъ, какъ и при нагруженной машинѣ.

Этому способу опредѣленія полезной работы былъ уже сдѣланъ упрекъ въ недостаточной точности, такъ какъ дѣйствительная работа тренія при полной нагрузкѣ машины вслѣдствіе увеличенія давленія больше, чѣмъ при холостомъ ходѣ.

Однако это не совсѣмъ вѣрно, такъ какъ установлено, что хорошо смазываемая машина при нагрузкѣ даетъ меньшую работу тренія, чѣмъ при холостомъ ходѣ. Это можно объяснить тѣмъ, что при нагруженной машинѣ подшипники больше нагрѣваются, масло становится тогда жиже и треніе меньше.

9. Регулированіе мощности.

Для сообразованія мощности машины съ потребностью энергіи необходимъ особый автоматическій регулирующій механизмъ. Въ прежнее время регулированіе мощности производилось путемъ торможенія впускаемаго



Фиг. 5 и 6. Регулированіе расширенія и наполненія.

свѣжаго пара (фиг. 5). Но регулированіе торможеніемъ, какъ будетъ сказано въ гл. 23, оказалось невыгоднымъ. Поэтому его примѣняютъ только въ маленькихъ сельскохозяйственныхъ локомобиляхъ; въ остальныхъ же слу-

чаяхъ регулированіе въ настоящее время производится исключительно путемъ измѣненій наполненія машины (фиг. 6).

10. Степень полезнаго дѣйствія.

При разсмотрѣніи дѣйствія паровой машины различаютъ степени полезнаго дѣйствія: термическую, термодинамическую, механическую эффективную, и экономическую.

Подъ термической степенью полез. дѣйствія η_{th} понимаютъ отношеніе индикаторной мощности къ затраченной теплотѣ i. При этомъ необходимо выразить работу въ тепловыхъ единицахъ или теплоту въ единицахъ работы. Аналогично подъ термическимъ коэфф. η_0 идеальной машины понимаютъ отношеніе располагаемой работы къ затраченной теплотѣ. При этомъ тепловое значеніе отработавшаго пара, по выработаннымъ нормамъ, слѣдуетъ отнести къ температурѣ питательной воды въ 0° C.

Чѣмъ ближе термическая степень полезнаго дѣйствія дѣйствительной машины къ степени полезн. дѣйствія идеальной машины, тѣмъ совершеннѣе она работаетъ. Отношеніе термической степени полезн. дѣйствія дѣйствительной машины къ термической степени полезн. дѣйствія идеальной машины, работающей въ тѣхъ же предѣлахъ давленій и температуръ, или что одно и то-же, отношеніе индикаторной мощности къ располагаемой мощности, выражаетъ собою термодинамическую степень полезн. дѣйствія или степень достоинства. Это отношеніе называется также индикаторной степенью полезн. дѣйствія.

Если степень достоинства относятъ къ эффективной мощности, то значеніе η_g слѣдуетъ умножить на механическую степень полезн. дѣйствія. Эффективная и индикаторная степени достоинства служатъ единственной

вѣрной мѣрой для сравнительной оцѣнки паровыхъ машинъ между собой и съ паровыми турбинами (гл. 39).

Обыкновенно термодинамическая степень полезн. дѣйствія и степень достоинства отличаются лишь тѣмъ, что первая относится лишь къ совершеннымъ машинамъ съ совершеннымъ расширеніемъ (процессъ Клаузіусъ-Ранкина), а послѣдняя къ машинамъ безъ потерь и съ несовершеннымъ расширеніемъ.

Мы же, ввиду соображеній, приведенныхъ въ гл. 19, не сдѣлаемъ здѣсь никакого различія между степень достоинства и термодинамической степенью полезнаго дѣйствія.

Что касается механической степени полезн. дѣйствія, то о ней уже сказано въ главѣ 8; здѣсь слѣдуетъ только разсмотрѣть эффективную степень полезн. дѣйствія η_e, подъ которой понимаютъ отношеніе полезной работы L_e къ затраченному количеству теплоты i.

Отсюда $\eta_e = \frac{L_e}{427 \cdot i} = \eta_{th} \cdot \eta_m = \eta_0 \cdot \eta_g \cdot \eta_m.$

Если умножить это значеніе полезнаго дѣйствія η_e на коэфф. котельной установки, то получается экономическая степень полезн. дѣйствія η'_w всей установки (кромѣ трубопроводовъ)

$$\eta'_w = \eta_k \cdot \eta_e = \eta_k \cdot \eta_0 \cdot \eta_g \cdot \eta_m.$$

Строго говоря, слѣдуетъ еще принять во вниманіе потерю теплоты въ паропроводахъ отъ котла до машины. Послѣдняя обусловливается неизбѣжнымъ лучеиспусканіемъ трубопровода, и главнымъ образомъ при длинныхъ паропроводахъ ею не слѣдуетъ пренебрегать.

Если изъ теплоты, сообщенной пару въ котлѣ, только часть η_e (степень полезнаго дѣйствія паропроводовъ) по-

ступаетъ въ машину, то экономическая степень полезнаго дѣйствія всей установки, включая и паропроводъ, будетъ

$$\eta_w = \eta_k \cdot \eta_l \cdot \eta_i \cdot \eta_g \cdot \eta_m.$$

Для практической оцѣнки полной паросиловой установки принимаютъ во вниманіе только экономическую или соотвѣтственно полную степень полезн. дѣйствія η_w.

III. Водяной паръ.

11. Насыщенный паръ.

Пусть закрытый, частью наполненный водой котелъ нагрѣвается. По мѣрѣ повышенія температуры воды паровое пространство наполняется болѣе и болѣе плотнымъ и горячимъ паромъ. Вновь образующіяся частицы пара сжимаютъ уже ранѣе образовавшіяся и повышаютъ такимъ образомъ его давленіе. При этомъ каждой температурѣ соотвѣтствуетъ совершенно опредѣленное давленіе пара и наоборотъ. О зависимости между температурой пара и его давленіемъ даетъ представленіе слѣдующая таблица на стр. 28 и 29.

Образовавшійся такимъ образомъ паръ называется насыщеннымъ. Пока паръ находится въ соприкосновеніи съ водою, онъ постоянно находится въ состояніи насыщенія. При этомъ различаютъ сухой насыщенный и влажный паръ. Образуемый въ котлѣ паръ всегда бываетъ болѣе или менѣе влаженъ.

При проводѣ пара отъ котла къ машинѣ происходитъ потеря теплоты (черезъ лучеиспусканіе). Вслѣдствіе этого часть пара сгущается, и если даже онъ оставляетъ котелъ въ сухомъ насыщенномъ видѣ, въ машину онъ поступаетъ въ болѣе или менѣе влажномъ состояніи. Содержаніе влажности въ парѣ бываетъ тѣмъ болѣе, чѣмъ

1	2	3	4	5	6	7
Абсо-лютн. давл. въ кгр. на кв. сант.	Температура		Удѣльн. объемъ въ кгр. въ 1 куб. м.	Удѣльн. вѣсъ куб. м. въ 1 кгр.	Содержаніе тепла	
	°C	абсол.			жидко-сти	пара
p	t	T	v''	γ''	i'	i''
0,02	17,3	290,3	68,126	0,01468	17,3	602,9
0,04	28,8	301,8	35,387	0,02826	28,8	608,3
0,06	36,0	309,0	24,140	0,04142	36,0	611,6
0,08	41,3	314,3	18,408	0,05432	41,4	614,1
0,10	45,6	318 6	14,920	0,06703	45,7	616,0
0,12	49 2	322,2	12,568	0,07956	49,3	617,7
0,15	53,7	326,7	10,190	0,09814	53,8	619,7
0,20	59,8	332,8	7,777	0,12858	59 9	622,4
0,25	64,6	337,6	6,307	0,1586	64,8	624,6
0,30	68,7	341,7	5,316	0,1881	68,9	626,4
0,40	75,5	348,5	4,060	0,2463	75,7	629,4
0,50	80,9	353,9	3,2940	0,3036	81,2	631,7
0,60	85,5	358,5	2,7770	0,3601	85,8	633,7
0,80	93,0	366,0	2,1216	0,4713	93,5	636,8
1,0	99,1	372,1	1,7220	0,5807	99,6	639,3
1,1	101,8	374,8	1,5751	0,6349	102,3	640,7
1,2	104,2	377,2	1,4521	0,6887	104,8	641,3
1,6	112,7	385,7	1,1096	0,9013	113,4	644,7
2,0	119,6	392,6	0,9006	1,1104	120,4	647,2
2,5	126,7	399,7	0,7310	1,3680	127,7	649,9
3,0	132 8	405,8	0,6163	1,6224	133,9	652,0
4,0	142,8	415,8	0,4708	2,1239	144,2	655,4
5,0	151,0	424,0	0,3820	2,6177	152,6	658,1
6,0	157,9	430,9	0,3220	3,1058	159,8	660,2
7,0	164,0	437,0	0,2786	3,5891	166,1	662,0
8,0	169,5	542,5	0,2458	4,0683	171,7	663,5
9,0	174,4	447,4	0,2200	4,5448	176,8	664,9
10,0	178,9	451,9	0,1993	5,018	181,5	666,1
11,0	183,1	456,1	0,1822	5,489	185,8	667,1
12,0	186,9	459,9	0,1678	5,960	189,9	668,1
13,0	190,6	463,6	0,15565	6,425	193,7	668,9
14,0	194,0	467,0	0,14515	6,889	197,3	669,7
15,0	197,2	470,2	0,13601	7,352	200,7	670,5
16,0	200,3	473,3	0,12797	7.814	203,9	671,2
18,0	206,1	479,1	0,11450	8,734	210,0	672,4
20,0	211,3	484,3	0,10365	9,648	215,5	673,4

8	9	10	11	12	13	14
Теплота парообразованія				Энтропія		
полная $i''-i'$	внутренняя $u''-u'$	внѣшн. AP $v''-v'$	Энергія пара	жидкости	пара	$s''-s'$ $\frac{r}{T}$
r	ρ	ψ	u''	s'	s''	
585,5	553,6	31,91	571,0	0,0616	2,0783	2,0167
579,4	546,3	33,15	575,1	0,1004	2,0202	1,9198
875,6	541,7	33,92	577,7	0,1240	1,9868	1,8628
572,7	538,2	34,49	579,6	0,1411	1,9631	1,8220
570,4	535,4	34,94	581,1	0,1546	1,9449	1,7903
568,4	533,1	35,32	582,3	0,1659	1,9300	1,7641
565,9	530,1	35,79	583,9	0,1799	1,9121	1,7322
562,6	526,1	36,42	586,0	0,1984	1,8890	1,6906
559,8	522,9	36,92	587,7	0,2129	1,8711	1,6582
557,5	520,2	37,34	589,1	0,2252	1,8566	1,6314
553,7	515,6	38,02	591,3	0,2448	1,8336	1,5888
550,5	512,0	38,56	593,1	0,2604	1,8159	1,5555
547,8	508,8	39,01	594,6	0,2734	1,8015	1,5281
543,3	503,6	39,73	597,0	0,2944	1,7789	1,4845
539,7	499,4	40,30	599,0	0,3111	1,7615	1,4504
538,1	497,5	40,55	599,8	0,3183	1,7541	1,4358
536,5	495,7	40,78	600,5	0,3250	1,7473	1,4223
531,2	489,7	41,54	603,0	0,3475	1,7248	1.3773
526,8	484,7	42,14	605,1	0,3655	1,7077	1,3420
522,2	479,1	42,74	607,1	0,3839	1,6903	1,3064
518,1	474,9	43,23	608,7	0,3993	1,6760	1,2767
511,2	467,2	44,01	611,3	0,4242	1,6537	1,2295
505,5	460,8	44,61	613,3	0,4442	1,6363	1,1921
500,4	455,3	45,10	615,0	0,4609	1,6221	1,1612
495,9	450,4	45,51	616,3	0,4753	1,6101	1,1348
491,8	446,0	45,86	617,5	0,4881	1,5997	1,1116
488,1	441,9	46,17	618,5	0,4995	1,5905	1,0910
484,6	438,2	46,43	619,4	0,5099	1,5822	1,0723
481,3	434,6	46,67	620,2	0,5194	1,5748	1,0554
478 2	431,3	46,88	620,9	0,5282	1,5678	1,0396
475,3	428,2	47,08	621,6	0,5364	1,5616	1,0252
472,5	425,2	47,26	622,2	0,5440	1,5557	1,0117
469,8	422,4	47,43	622,7	0,5513	1,5504	0,9991
467,3	419,7	47,58	623,2	0,5581	1,5452	0,9871
462,4	414,6	47,85	624,1	0,5707	1,5359	0,9652
457,9	409,8	48,08	624,9	0,5821	1,5274	0,9453

длиннѣе трубопроводъ, и чѣмъ хуже его изоляція. *Для просушки пара передъ поступленіемъ его въ машину требуется такъ называемый водоотдѣлитель.* Въ самой машинѣ, отчасти вслѣдствіе охлажденія на стѣнкахъ и частью вслѣдствіе расширенія, паръ опять переходитъ во влажное состояніе.

Для обращенія 1 килогр. воды при 0° С. въ сухой насыщенный паръ температуры t° С. необходима теплота, которая называется теплотой пара i''. Она состоитъ изъ:

1. Теплоты жидкости i', которую необходимо затратить для нагрѣванія воды отъ 0° С. до t° С.,

2. Теплоты парообразованія r, называемой также скрытой теплотой, которая требуется для превращенія 1 кил. температуры воды t° С. въ паръ той же температуры.

Скрытая теплота r въ свою очередь состоитъ изъ внутренней теплоты парообразованія ρ, требуемой для измѣненія агрегатнаго состоянія, и внѣшней теплоты парообразованія $AP\ (v''-v')$, служащей для преодолѣнія давленія, дѣйствующаго на испаряемую воду. Здѣсь разность $v''-v'$ есть увеличеніе объема воды при испареніи[1]).

Внѣшняя теплота парообразованія во время испаренія превращается въ работу (работу наполненія или полнаго давленія) и такимъ образомъ уже въ парѣ не содержится. Остается лишь теплота пара $i'+\rho$.

Теплота жидкости i' приблизительно составляетъ $i' \cong t - t_w$ или при $t_w = 0 \cdot i' = t$ калорій, при чемъ t_w — температура питательной воды.

---

[1]) Удѣльный объемъ пара v'', какъ видно изъ таблицы, зависитъ отъ его давленія; удѣльный же объемъ воды наоборотъ можетъ быть принять постояннымъ, а именно $v'' = 0{,}001$ куб. метр.

Теплота парообразованія r значительно больше; по Реньо она приблизительно можетъ быть принята $r \cong 607 - 0{,}708\, t$. Какъ видно изъ уравненія, r уменьшается съ увеличеніемъ давленія.

Общее количество теплоты для образованія 1 килогр. пара изъ воды при 0° С. будетъ $i'' = i' + r$, которое по Реньо можетъ быть принято приблизительно равнымъ

$$i'' \cong 606{,}5 + 0{,}305\, t.$$

Эти уравненія Реньо раньше всюду примѣнялись, но въ послѣднее время новѣйшія изслѣдованія показали, что они не даютъ точныхъ значеній. Поэтому Молье при составленіи своихъ таблицъ и діаграммъ для водяного пара пользовался приведенными въ концѣ этой главы уравненіями. При этомъ для насыщеннаго пара получены значенія, показанныя на таблицѣ стр. 28 и 29.

Кромѣ того въ этой таблицѣ даны еще удѣльные объемы, вѣсъ и энергія пара.

Подъ энергіей пара u'' понимаютъ заключенную въ немъ внутреннюю работу или, что одно и то-же, теплоту пара. Она согласно вышеуказанному получается, какъ разность между общимъ содержаніемъ теплоты въ парѣ и внѣшней теплотой парообразованія, или какъ сумма теплоты жидкости и внутренней теплоты парообразованія, т.е.

$$u'' = i'' - AP\,(v'' - v') = i + \rho.$$

Затѣмъ въ таблицѣ для пара еще даны энтропіи жидкости и пара, а также парообразованія. Энтропія играетъ важную роль въ изслѣдованіи паровыхъ машинъ и тепловыхъ двигателей вообще. Она примѣняется для вычерчиванія энтропійныхъ или тепловыхъ діаграммъ (сравн. главы 15 -17)

Понятіе объ энтропіи, какъ таковое, не поддается опредѣленію, какъ понятія о температурѣ, давленіи и объемѣ.

Подъ энтропіей или тепловымъ вѣсомъ s понимаютъ величину, которая, будучи умножена на абсолютную температуру, даетъ количество тепла, т. е. принимаютъ

$$di = T \cdot ds \quad \text{или} \quad s = \int \frac{di}{T}.$$

Можно только говорить объ относительной величинѣ энтропіи, но не объ ея абсолютномъ значеніи, т. е. можно только опредѣлить, насколько энтропія измѣняется относительно принятаго нулевого состоянія. Обыкновенно энтропію относятъ къ водѣ при 0° С. Приращеніе или убываніе энтропіи за время измѣненія состоянія тѣла опредѣляется начальнымъ и конечнымъ его состояніемъ. Способъ измѣненій состоянія тѣла при этомъ не играетъ роли.

Предыдущіе выводы относятся къ сухому насыщенному пару. Въ практикѣ же паръ, какъ было указано выше, всегда болѣе или менѣе влаженъ. Составъ пара дается въ вѣсовыхъ частяхъ. При этомъ вѣсъ x чистаго сухого пара въ 1 килогр. смѣси, называется содержаніемъ пара или относительнымъ количествомъ пара. Вѣсъ же жидкости въ 1 килогр. пара, т. е. $1 - x$ кгр., опредѣляетъ влажность пара. Какъ x, такъ и $1 - x$ часто выражаются въ процентахъ; такъ если напр. $x = 0{,}95$ и $1 - x = 0{,}05$, то говорятъ, что относительное содержаніе пара составляетъ 95%, а влажность — 5%

Удѣльный объемъ v влажнаго пара меньше, нежели сухого пара (v''). Если пренебречь объемомъ жидкости, такъ какъ значеніе $(1 - x)\,0{,}001$ при обыкновенныхъ условіяхъ безконечно мало по сравненію съ объемомъ пара, то можно принять

$$v = x \cdot v'' \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{\gamma''}{x}.$$

Поэтому удѣльный вѣсъ влажнаго пара постоянно больше удѣльнаго вѣса сухого пара (γ''). Содержаніе же теплоты i, наоборотъ, меньше.

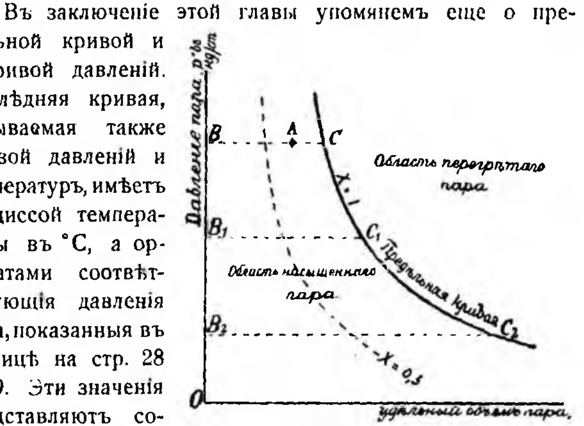
Общее количество теплоты влажнаго пара составляетъ только

$$i = i' + x r.$$

Аналогично получается энергія влажнаго пара

$$u = i' + x \rho.$$

Въ заключеніе этой главы упомянемъ еще о предѣльной кривой и о кривой давленій. Послѣдняя кривая, называемая также кривой давленій и температуръ, имѣетъ абсциссой температуры въ °C, а ординатами соотвѣтствующія давленія пара, показанныя въ таблицѣ на стр. 28 и 29. Эти значенія представляютъ собою значенія Реньо, которыя оказались



Фиг. 7. Предѣльная кривая, кривыя постоянной сухости x и влажности $1-x$.

достаточно точными и поэтому здѣсь сохранены. Если на ординатахъ будемъ откладывать давленія пара, а за абсциссы примемъ удѣльные объемы сухого насыщеннаго пара, то получаемъ предѣльную кривую или кривую насыщенія (фиг. 7). Послѣдняя соотвѣтствуетъ такому измѣненію состоянія, при которомъ паръ постоянно остается сухимъ насыщеннымъ, т. е. при которомъ относительное количе-

ство пара $x = 1$. Предѣльная кривая отдѣляетъ область насыщенія отъ области перегрѣва.

Если состояніе пара опредѣляется точкой, напр. A, лежащей между осью ординатъ и предѣльной кривой, то здѣсь имѣется смѣсь пара и жидкости. При этомъ BA соотвѣтствуетъ удѣльному объему пара, а OB его давленію. Относительное количество пара $x = \frac{BA}{BC}$, а влажность $1 - x = \frac{AC}{BC}$.

Чѣмъ влажнѣе паръ, тѣмъ ближе точка A, расположена къ оси ординатъ. Послѣдняя на нашей фигурѣ соотвѣтствуетъ нижней предѣльной кривой, для которой $x = 0$. Такъ какъ согласно вышеуказанному объемъ жидкости очень малъ въ сравненіи съ объемомъ пара, то практически кривая объемовъ жидкости совпадаетъ съ осью ординатъ.

Если горизонтали BC, B_1C_1 ... раздѣлить на одинаковое число равныхъ частей и соединить между собою полученныя точки, то получаются кривыя постоянныхъ относительныхъ количествъ пара x или влажности $1 - x$. На нашей діаграммѣ (фиг. 7) напр. нанесена кривая $x = 0{,}5$.

Для болѣе точнаго изслѣдованія индикаторныхъ діаграммъ, главнымъ образомъ кривыхъ расширенія, рекомендуется построеніе предѣльной кривой; болѣе подробно см. въ гл. 30.

12. Перегрѣтый паръ.

Если насыщенный паръ, какой получается отъ котла, будемъ дальше нагрѣвать, то онъ переходитъ въ состояніе перегрѣва. При этомъ объемъ его увеличивается, и

температура превышаетъ температуру насыщенія, соотвѣтствующую давленію въ котлѣ. Давленіе пара во время перегрѣва не мѣняется, такъ какъ система трубъ перегрѣвателя находится въ общеніи съ паровымъ пространствомъ котла.

Если t температура перегрѣтаго пара и t_s насыщеннаго пара того же давленія, то $t - t_s$ выражаетъ собой перегрѣвъ. Чѣмъ больше перегрѣвъ, тѣмъ далѣе вправо отъ кривой насыщенія расположится точка состоянія на кривой pv.

Если рѣчь идетъ исключительно о развитіи работы' то по изложеннымъ въ гл. 24 и 34 основаніямъ въ настоящее время почти исключительно примѣняется перегрѣтый паръ и еще тѣмъ болѣе, что послѣдній допускаетъ нѣкоторыя конструктивныя упрощенія паровыхъ машинъ.

Теоретическая польза перегрѣва въ общемъ сравнительно незначительна. Главное его значеніе заключается въ томъ, что перегрѣтый паръ обладаетъ меньшей теплопроводимостью, и вслѣдствіе этого получаются меньшія потери отъ охлажденія (въ трубопроводахъ и машинѣ), нежели при насыщенномъ парѣ. Кромѣ того здѣсь слѣдуетъ упомянуть о меньшемъ сопротивленіи при движеніи перегрѣтаго пара. Количество тепла, которое необходимо затратить для превращенія 1 кгр. воды 0° С. въ перегрѣтый паръ, составляетъ

$$i = i'' + c_p\,(t - t_s).$$

Теплоемкость перегрѣтаго пара при постоянномъ давленіи раньше всюду принималось по Реньо равной $c_p = 0{,}48$. Однако опыты Кноблауха и Якоби показали, что c_p перемѣнная величина, и значеніе ея гораздо больше. Среднее значеніе c_p для вычисленія теплоты перегрѣва можетъ быть взято изъ слѣдующей таблицы.

Среднія теплоемкости между t_s и t.

		Абсол. давл. атм. p Температ. насыщ. t_s	4 143	6 158	8 169	10 179	12 187	14 194
Температура перегрѣтаго пара	$t = 150$		0,515	—	—	—	—	—
	$t = 200$		0,502	0,530	0,560	0,597	0,635	0,677
	$t = 250$		0,495	0,514	0,532	0,552	0,570	0,588
	$t = 300$		0,492	0,505	0,517	0,530	0,541	0,550
	$t = 350$		0,492	0,503	0,512	0,522	0,529	0,536
	$t = 400$		0,494	0,504	0,512	0,520	0,526	0,531

Молье избѣгалъ вышеприведеннаго раньше и всюду примѣнявшагося способа вычисленія, по которому къ теплотѣ i'' въ состояніи насыщенія прибавляется теплота перегрѣва, опредѣляя i сразу по нижеприведеннымъ формуламъ. Эти формулы, а также и формулы для v, s, u и c_p Мольеръ составилъ на основаніи уравненія состоянія Каллантара (ср. гл. 13) и кривой давленій Реньо.

Эти формулы суть

$$i = 594{,}7 + 0{,}477\, t - \mathfrak{J}\, p$$

$$s = 0{,}477 \lg n\, T - 0{,}11 \lg n\, p - \mathfrak{S}\, p - 1{,}0544$$

$$v = 0{,}001 + 47 \frac{T}{P} - \mathfrak{B}$$

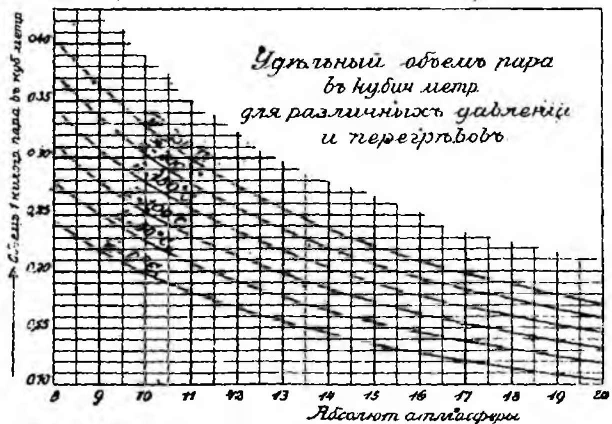
$$u = 564{,}7 + 0{,}367\, t - \tfrac{10}{3} A\, \mathfrak{B}\, P$$

$$c_p = 0{,}477 + \tfrac{13}{3} \mathfrak{S}\, p$$

Вспомогательныя величины $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{J}$ и $\mathfrak{S}$ для температуръ между 100 и 350° С. даны въ таблицѣ на стр. 38.

На фиг. 8 графически изображено содержаніе теплоты, а на фиг. 9 — удѣльные объемы перегрѣтаго пара для различныхъ давленій и перегрѣвовъ. Содержаніе теплоты кромѣ того легко опредѣляется еще изъ энтропійной діаграммы (JS) фиг. 15. Всѣ эти три діаграммы построены на основаніи формулъ Молье.

Фиг. 8. Количество теплоты въ перегрѣтомъ парѣ для разныхъ давленій и перегрѣвовъ и отнесенныя къ питательной водѣ въ 0^0 C.



Фиг. 9. Удѣльный объемъ перегрѣтаго и насыщеннаго паровъ.

Таблица для вспомогательныхъ величинъ $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{J}$ и $\mathfrak{S}$.

t	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{J}$	$\mathfrak{S}$	t	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{J}$	$\mathfrak{S}$
100	0,0265	2,66	0,00554	260	0,0081	0,79	0,00118
120	0,0223	2,24	0,00442	265	0,0078	0,77	0,00113
130	0,0205	2,06	0,00397	270	0,0076	0,75	0,00109
140	0,0189	1,89	0,00357	275	0,0074	0,72	0,00105
150	0,0174	1,75	0,00321	280	0,0071	0,70	0,00101
160	0,0161	1,61	0,00291	285	0,0069	0,68	0,00097
170	0,0149	1,49	0,00263	290	0,0067	0,66	0,00093
180	0,0139	1,38	0,00239	295	0,0065	0,64	0,00090
190	0,0129	1,29	0,00217	300	0,0063	0,62	0,00086
200	0,0120	1,20	0,00198	305	0,0062	0,60	0,00083
210	0,0112	1,11	0,00181	310	0,0060	0,58	0,00080
220	0,0105	1,04	0,00166	315	0,0058	0,57	0,00077
230	0,0098	0,97	0,00152	320	0,0057	0,55	0,00074
240	0,0092	0,91	0,00139	325	0,0055	0,53	0,00072
245	0,0089	0,88	0,00134	330	0,0053	0,52	0,00069
250	0,0086	0,85	0,00128	340	0,0051	0,49	0,00064
255	0,0083	0,82	0,00123	350	0,0048	0,46	0,00060

13. Общія уравненія состоянія водяного пара.

При помощи уравненія состоянія водяного пара получается полная зависимость между величинами p, v и T, характеризующими собой состояніе пара. Для газовъ уравненіе состоянія или характеристическое уравненіе имѣетъ видъ $pv = RT$. Для водяного пара эта зависимость не такъ проста.

Въ основѣ таблицъ на стр. 28 и 29, и формулъ Мольера лежитъ найденное Калландаромъ уравненіе

$$v - v' = \frac{RT}{p} - C\left(\frac{273}{T}\right)^n.$$

Здѣсь постоянныя имѣютъ слѣдующее значеніе

$$R = 47{,}00 \quad AR = 0{,}1100 \quad C = 0{,}075$$

$$n = -\frac{10}{3} \quad v' = 0{,}001 \text{ (объемъ воды).}$$

Приведенное уравненіе служитъ для перегрѣтаго и сухого насыщеннаго паровъ. При этомъ объемомъ воды

при практическихъ расчетахъ можно пренебречь. Постоянныя C и n опредѣлены Каллендаромъ на основаніи опытовъ торможенія.

Для насыщеннаго водяного пара въ качествѣ приближенной формулы часто примѣняется предложенная Цейнеромъ зависимость

$$p^m \cdot v'' = C, \text{ гдѣ } m = 0{,}9393 \quad C = 1{,}70213.$$

При насыщенномъ парѣ каждому давленію соотвѣтствуетъ только одна опредѣленная температура и только одинъ объемъ; при влажномъ же парѣ послѣднее условіе не имѣетъ мѣста, и поэтому для опредѣленія состоянія пара необходимо задавать еще относительное количество пара x.

14. Особыя измѣненія состоянія водяного пара.

Измѣненіе состоянія пара имѣетъ мѣсто тогда, когда величины p, v и T отдѣльно или вмѣстѣ измѣняются. Помимо адіабатическаго измѣненія состоянія пара при всякомъ измѣненіи состоянія пара происходитъ сообщеніе или заимствованіе теплоты. Отношенія, существующія во время процесса между p, v и T, опредѣляются на основаніи уравненій состоянія или изъ діаграммъ давленій и энтропійной. Наиболѣе важные процессы или измѣненія состоянія суть:

1. по изотермѣ (температура остается постоянной),
2. по адіабатѣ (теплота не сообщается и не заимствуется),
3. по кривой постояннаго относительнаго количества теплоты (влажность остается постоянной),
4. по кривой постояннаго удѣльнаго объема v,
5. по кривой постояннаго давленія p.

Изображая процессы 4 и 5 въ діаграммѣ объемовъ и давленій, получимъ прямыя, параллельныя осямъ координатъ. Послѣдній процессъ имѣетъ мѣсто при впускѣ и выпускѣ, если пренебречь явленіями торможенія. Процессъ 4, наоборотъ, имѣетъ мѣсто тогда, когда давленіе у конца хода поршня мгновенно падаетъ до противодавленія. Въ частномъ случаѣ насыщеннаго пара процессы 1 и 5 одинаковы, т. е. изотерма здѣсь одновременно служитъ и линіей постояннаго давленія.

При адіабатическомъ измѣненій состоянія измѣняются величины p, v и T безъ сообщенія или заимствованія теплоты, т. е. чисто механическимъ путемъ расширенія или сжатія пара. Если бы стѣнки цилиндра паровой машины были бы абсолютно теплонепроницаемы, то расширеніе и сжатіе пара происходили бы по чисто адіабатическоми процессу.

Уравненіе Цейнера для діабаты имѣетъ видъ

$$p \cdot v^k = \text{постоян.},$$

при чемъ

$k = 1{,}135$ для сухого насыщеннаго пара,

$k = 1{,}035 + 0{,}1\,x$ для влажнаго пара ($x > 0{,}7$),

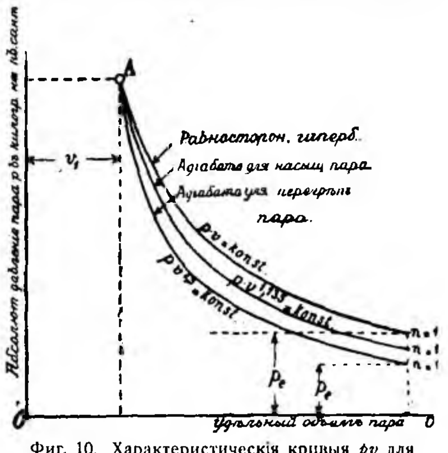
$k = 1{,}3$ для перегрѣтаго пара (по Цейнеру 1,333).

Такъ какъ произведенная паромъ во время адіабатическаго расширенія работа совершается исключительно насчетъ собственной теплоты пара, то температура пара въ періодъ расширенія должна падать. Поэтому съ уменьшеніемъ давленія перегрѣтый паръ все больше и больше приближается къ состоянію насыщенія. По наступленіи послѣдняго показатель „k“ ужъ не равняется 1,3; для дальнѣйшаго расширенія въ области насыщенія принимается $k = 1{,}135$.

При сжатіи пара температура его повышается, такъ какъ совершаемая поршнемъ или соотвѣтственно махови·

комъ работа сжатія превращается въ теплоту. Паръ, вначалѣ мокрый, во время сжатія становится сухимъ, а впослѣдствіи переходитъ въ состояніе перегрѣва. Проще всего эти процессы могутъ быть прослѣжены на энтропійной діаграммѣ (см. слѣдующую главу).

Въ дѣйствительности же стѣнки цилиндра теплопроницаемы, и поэтому происходятъ потери теплоты путемъ излученія и обмѣна теплоты. Вслѣдствіе этого кривыя расширенія и сжатія не имѣютъ вида адіабаты, хотя постоянно идутъ по уравненію политропы $p \cdot v^n =$ постоян.



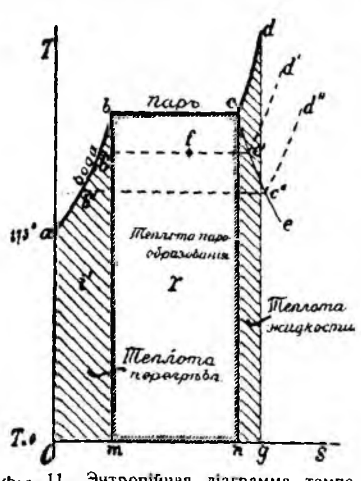
Фиг. 10. Характеристическія кривыя pv для водяного пара.

Предѣльная кривая также слѣдуетъ этому закону; для нея показатель $n = 1{,}0646$. Уравненіе предѣльной кривой имѣетъ видъ $p \cdot v^{1{,}0646} = 1{,}76133$. Оно даетъ намъ возможность опредѣлить точку насыщенія, хотя проще эта точка опредѣляется по энтропійной таблицѣ (гл. 17).

Слѣдуетъ замѣтить, что кривыя $p\,v$ спускаются тѣмъ быстрѣе, чѣмъ больше показатель n (фиг. 10). Наиболѣе сильное пониженіе даетъ адіабата.

15. Энтропійная кривая температуръ.

Подобно тому, какъ съ помощью діаграммы объема и давленій возможно изобразить произведенную паромъ внѣшнюю работу при всякомъ измѣненіи его состоянія, такъ и энтропійная діаграмма температуръ или діаграмма TS изображаетъ заимствованное или отданное паромъ количество теплоты.



Фиг. 11. Энтропійная діаграмма температуръ (тепловая діаграмма водяного пара).

Энтропійная кривая получается, если въ координатной системѣ значенія энтропій будутъ нанесены въ видѣ абсциссъ, а соотвѣтственныя температуры въ видѣ ординатъ. Удобнѣе всего при этомъ пользоваться таблицей для пара, на которой даны энтропія жидкости (s') и энтропія пара (s'') для различныхъ температуръ и давленій, при чемъ энтропія воды при 0° С принята за 0.

Нагрѣваніе воды на діаграммѣ TS (фиг. 11) изображено линіей ab. Точка a соотвѣтствуетъ температурѣ 0° С. или абсолютной температурѣ въ 273 С. Во время парообразованія при постоянномъ давленіи температура болѣе не повышается; поэтому энтропійная кривая парообразованія представляетъ собою изотерму. Этотъ изотермическій процессъ на діаграммѣ изображается прямой bc, параллельной оси абсциссъ.

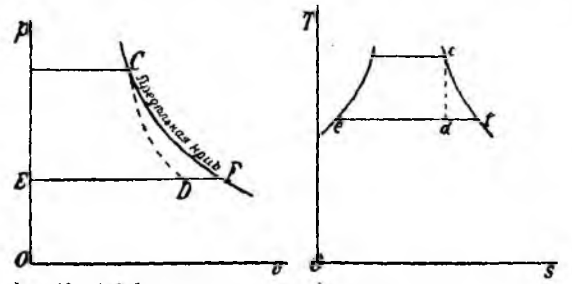
Въ точкѣ *c* вся вода испарена, т. е. получается сухой насыщенный паръ. Продолжая нагрѣвать паръ при постоянномъ давленіи, его переводятъ въ состояніе перегрѣва. Теперь температура пара быстро повышается, между тѣмъ какъ энтропія возрастаетъ довольно медленно. Энтропійная кривая перегрѣва имѣетъ примѣрный видъ кривой „*c d*“.

Расположенная подъ линіей *a b* заштрихованная плоскость изображаетъ теплоту жидкости *i'*. Теплота парообразованія *r* изображена расположенной подъ *b c* окаймленной площадью прямоугольника, между, тѣмъ какъ расположенная подъ *c d* заштрихованная плоскость соотвѣтствуетъ теплотѣ перегрѣва.

Если бы нагрѣваніе воды производилось только до точки *b*, то получилась бы энтропійная линія *a' b' c' d'*. Если же парообразованіе происходитъ при еще низшей температурѣ, то получается, напр., линія *a'' b'' c'' d''*. Конечныя точки парообразованія лежатъ на кривой *c e*, которая соотвѣтствуетъ кривой насыщенія въ діаграммѣ *p v*. Поэтому кривую *c e* называютъ верхней предѣльной кривой; нижняя предѣльная кривая изображена линіей *a b*. Послѣдняя здѣсь не совпадаетъ съ осью ординатъ, какъ въ діаграммѣ *p v*.

Точки, лежащія между обѣими предѣльными кривыми, соотвѣтствуютъ влажному пару. Такъ, напр., въ какой нибудь произвольной точкѣ *f* относительное количество пара будетъ $x = \frac{b' f}{b' c'}$, а влажность пара $1 - x = \frac{f c'}{b' c'}$. Такимъ образомъ состояніе пара опредѣляется такимъ же способомъ, какъ и по діаграммѣ *p v* (ср. гл. 11). Точки, лежащія за предѣльной кривой, соотвѣтствуютъ перегрѣтому пару. Для всѣхъ точекъ на предѣльной кривой *c e* относительное количество пара равно 1.

На самой діаграммѣ TS изотермическій процессъ изображается прямой, параллельной оси абсциссъ, а адіабатическій прямой, параллельной оси ординатъ, такъ какъ въ послѣднемъ случаѣ энтропія остается постоянной. Путемъ же соединенія всѣхъ точекъ одинаковаго относительнаго количества пара получается цѣлый рядъ кривыхъ постояннаго относительнаго количества пара[1]). Соединяя съ другой стороны точки постояннаго давленія,



Фиг. 12. Адіабатическое расширеніе сухого насыщеннаго пара.

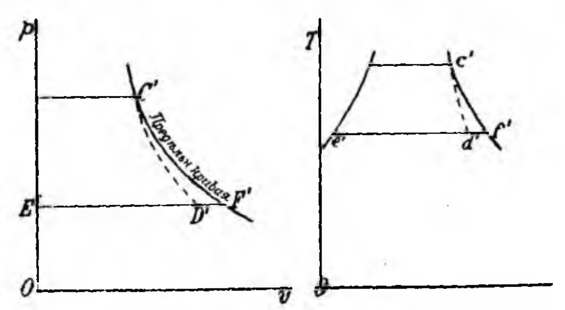
получаютъ кривыя постояннаго давленія. Послѣднія въ области насыщенія, подобно изотермамъ, параллельны оси абсциссъ.

Допустимъ, что въ цилиндрѣ находится сухой насыщенный паръ. Пусть состояніе пара въ діаграммѣ pv изобразится точкой C или соотвѣтствующей ей точкой c въ тепловой діаграммѣ (фиг. 12). Паръ расширяется до точки D или соотвѣтственно d. Такъ какъ на послѣдней діаграммѣ адіабата изображается вертикальной линіей, то легко опредѣлить конечное состояніе пара. Какъ видно паръ во время расширенія становится влажнымъ и отно-

[1]) Вчерчиваніе кривыхъ постоянной влажности пара производится такимъ же способомъ, какъ и при діаграммѣ pv (гл. II).

сительное количество пара x постоянно уменьшается. Въ точкѣ d получается $x = \frac{ed}{ef}$. Соотвѣтствующая точкѣ d точка D на діаграммѣ pv получается путемъ раздѣленія разстоянія EF въ томъ же отношеніи, какъ и ef.

Наоборотъ, при адіабатическомъ сжатіи отъ D до C или соотвѣтственно отъ d до c паръ постепенно стано-



Фиг. 13. Расширеніе сухого насыщеннаго пара при приводѣ теплоты путемъ отопленія.

вится суше. Если сжимается первоначально сухой паръ, то наступаетъ его перегрѣвъ.

Если паръ расширяется по кривой $C' D'$ или соотвѣтственно $c' d'$ (фиг. 13), то во время расширенія ему сообщается теплота (черезъ стѣнки путемъ обмѣна теплоты или отъ подогрѣвающаго пара).

Сообщеніе теплоты при этомъ бываетъ тѣмъ больше, чѣмъ болѣе вправо идетъ кривая $c' d'$. Если же кривая измѣненія состоянія уклонена влѣво, то это означаетъ выдѣленіе теплоты. Количество теплоты, сообщаемой или выдѣляемой во время расширенія, изображаются плоскостями, лежащими ниже кривой измѣненія состоянія. При расширеніи перегрѣтаго пара его состояніе приближается

къ состоянію насыщенія. Примѣръ I главы 17 показываетъ способъ опредѣленія точки насыщенія.

16. Тепловая діаграмма.

Для кругового процесса кривая TS превращается въ замкнутую энтропійную или тепловую діаграмму. При круговомъ процессѣ Карно, она, напр., имѣетъ видъ прямоугольника (ср. гл. 18).

Тепловая діаграмма вмѣстѣ съ діаграммой давленій даетъ наглядное представленіе объ измѣненіи состоянія пара въ паровой машинѣ. Болѣе подробныя свѣдѣнія о тепловой діаграммѣ идеальныхъ (безъ потерь) и дѣйствительныхъ машинъ приведены въ слѣдующихъ главахъ.

Иногда для опредѣленныхъ цѣлей примѣняютъ также діаграммы, у которыхъ теплота принимается какъ потокъ, который развѣтвляется на отдѣльныя вѣтви (фиг. 63 и 64). Такія діаграммы главнымъ образомъ примѣняются для графическаго изображенія тепловыхъ балансовъ. Онѣ съ тепловыми діаграммами ничего общаго не имѣютъ и по нимъ нельзя заключать о внутреннихъ процессахъ.

17. Энтропійныя таблицы.

Такъ какъ вообще принимаются во вниманіе только тѣ состоянія пара, которыя расположены близъ верхней предѣльной кривой, то обыкновенно пользуются только этой частью тепловой кривой (TS). Поэтому, начертивши верхнюю предѣльную кривую безъ нижней въ соотвѣтственно большемъ масштабѣ и нанесши на ней линіи постояннаго давленія p и постояннаго относительнаго количества пара x, получаютъ энтропійную таблицу (фиг. 14). Иногда на полученной такимъ образомъ тепловой діаграм-

мѣ TS наносятъ еще и кривыя равнаго содержанія теплоты и постояннаго удѣльнаго объема.

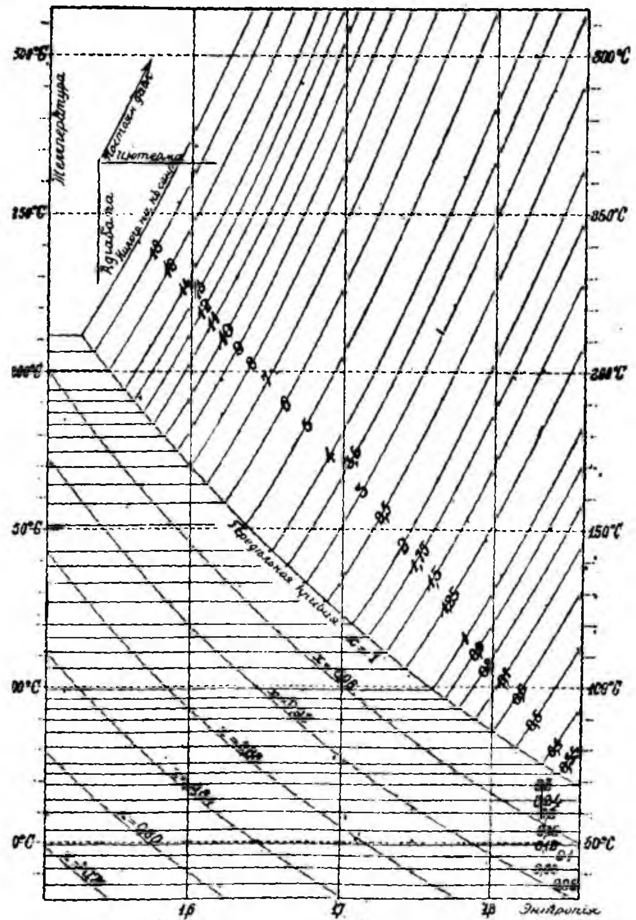
Въ то время какъ на обыкновенныхъ энтропійныхъ діаграммахъ (фиг. 11) абсолютныя температуры T нанесены въ видѣ ординатъ, въ предложенной Моллье діаграммѣ JS (фиг. 15) за ординаты принимаются значенія i содержанія теплоты въ парѣ. Эта діаграмма имѣетъ то громадное преимущество, что паденія теплоты непосредственно получаются изъ діаграммы въ видѣ отрѣзковъ, между тѣмъ какъ въ діаграммахъ TS соотвѣтственныя тепловыя площади необходимо планиметрировать.

На діаграммѣ JS также могутъ быть нанесены кривыя постоянной влажности, постоянной температуры и постоянныхъ объема и давленія. Адіабатическія измѣненія состоянія здѣсь также изображаются при помощи отрѣзковъ вертикальныхъ прямыхъ. Если содержаніе теплоты остается постояннымъ, какъ это имѣетъ мѣсто, напр., при торможеніи пара, то кривая состоянія въ діаграммѣ JS имѣетъ видъ горизонтальной прямой.

Энтропійныя таблицы примѣняются главнымъ образомъ при изслѣдованіи адіабатическихъ измѣненій состоянія.

Примѣръ I. Опредѣлить относительныя количества пара и удѣльные объемы при расширеніи пара давленіемъ 12 манометрическихъ атмосферъ и 300° С въ абсолютно теплонепроницаемомъ цилиндрѣ одинъ разъ до атмосфернаго давленія (безъ конденсаціи), другой разъ до давленія въ конденсаторѣ = 0,1 атм.? При какомъ давленіи достигается насыщеніе? Каково относительное расширеніе пара.

Состояніе пара въ концѣ расширенія получается, если мы въ діаграммѣ TS или JS черезъ точку, соотвѣтствующую начальному состоянію пара, проведемъ вертикальную линію до соотвѣтствующаго конечнаго давленія (срав. фиг. 22). Тогда можно прямо изъ діаграммы



Фиг. 14. Энтропійная таблица (энтропійная діаграмма температуръ) для водяного пара.

опредѣлить относительное количество пара. Въ нашемъ случаѣ для давленiя въ 1 атмосферу получается $x = 0{,}943$, а для давленiя въ 0,1 атм. получается $x = 0{,}851$. По этимъ числамъ при помощи таблицъ для пара можно вычислить удѣльные объемы; соотвѣтственно они составляютъ $0{,}943 \cdot 1{,}722 = 1{,}62$ куб. метр. и $0{,}851 \cdot 14{,}92 = 12{,}7$ куб. метр. Если имѣется въ распоряженiи энтропiйная таблица, на которой нанесены кривыя v, то можно сразу найти объемы путемъ отложенiя.

Точка насыщенiя лежитъ въ точкѣ пересѣченiя адiабаты съ предѣльной кривой; въ данномъ случаѣ это происходитъ при давленiи около 2,9 абсол. атм. Соотвѣтствующiй объемъ пара по таблицѣ составляетъ $v = 0{,}64$ куб. метр.

Послѣднее число можетъ быть получено также и путемъ вычисленiя, если скомбинировать между собою уравненiя адiабаты и предѣльной кривой (гл. 14).

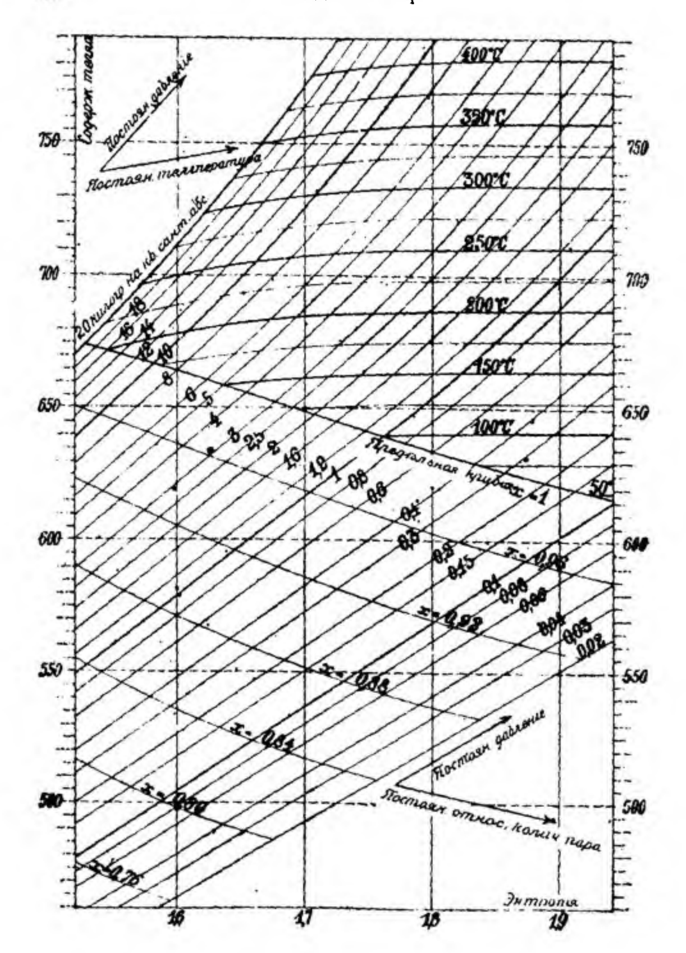
Соотвѣтствующее значенiе p получается изъ уравненiя предѣльной кривой или проще изъ таблицы для пара.

Такъ какъ удѣльный объемъ свѣжаго пара, согласно фиг. 9, составляетъ 0,2 куб. метра, то расширенiе при работѣ безъ конденсацiи составляетъ $0{,}2 : 1{,}62 = 1 : 8{,}1$, а при работѣ съ конденсацiей $0{,}2 : 12{,}7 = 1 : 63{,}5$. Такимъ образомъ мы видимъ, что при работѣ съ конденсацiей расширенiе бываетъ очень значительно. Для полнаго использованiя этого расширенiя въ машинѣ, объемъ цилиндра долженъ быть сдѣланъ въ 63,5 раза больше объема наполненiя, что практически невыполнимо.

Поэтому расширенiе использовывается только отчасти, и въ концѣ хода поршня допускается соотвѣтственное паденiе давленiя (ср. гл. 25).

Примѣръ II. Пусть паръ съ начальнымъ давленiемъ 12 манометрич. атмосферъ расширяется адiабатически до конечнаго давленiя 1,4 и соотвѣтственно 0,8 абс. атм. Опредѣлить температуры пара, при которыхъ онъ въ концѣ расширенiя будетъ сухимъ насыщеннымъ.

Опредѣлимъ на энтропiйной таблицѣ (фиг. 14 и 15) точки верхней предѣльной кривой, соотвѣтствующiя давленiю въ 1,4 и соотвѣтственно въ 0,8 атм. Черезъ эти точки проводимъ вертикальныя линiи до пересѣченiя съ линiей давленiя 13 абс. атмосферъ; тогда сразу опредѣляются


Содерж. тепла
Постоян. давление
Постоян. температура
20 килогр. на кв. сант. абс.
400°C
350°C
300°C
250°C
200°C
150°C
100°C
50°
Предельная кривая x=1
x=0,96
x=0,92
x=0,88
x=0,84
x=0,80
x=0,76
Постоян. давление
Постоян. относ. колич. пара
Энтропия
750
700
650
600
550
500
1,6
1,7
1,8
1,9

соотвѣтственныя температуры. При этомъ для конечнаго давленія въ 1,4 атм. получается начальная температура въ 370° С, а для 0,8 атм. она получается 427° С.

Если расширившійся паръ выпускается, то, какъ видно изъ предыдущаго примѣра, его объемъ значительно увеличивается, однако безъ измѣненія содержанія теплоты. Такъ какъ паръ въ концѣ періода расширенія бываетъ насыщенный то отъ расширенія перегрѣвается, явленіе предваренія выпуска представляетъ собою ничто иное, какъ торможеніе его.

Примѣръ III. Пусть паръ съ манометрич. давленіемъ въ 12 атм. и 300° С расширяется адіабатически до давленія въ конденсаторѣ (0,1 атм.). Опредѣлить содержаніе теплоты въ килограммѣ пара въ концѣ расширенія? Какое было бы содержаніе теплоты при неполномъ расщиреніи, если конечное давленіе пара было бы 0,8 абс. атм.

Проводя въ діаграммѣ Моллье изъ начальной точки вертикаль до противодавленія въ 0,1 атм., находимъ содержаніе теплоты пара въ конечномъ его состояніи 530 калор. При несовершенномъ расширеніи до конечнаго давленія въ 0,8 атм. получается содержаніе теплоты въ конечномъ состояніи = 600 калорій.

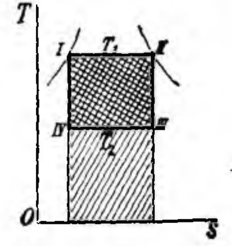
Такъ какъ содержаніе теплоты въ свѣжемъ парѣ по діаграммѣ JS составляетъ 728,5 калор., то адіабатическое паденіе тепла, располагаемое для превращенія въ работу на каждый килограммъ пара, въ первомъ случаѣ составляетъ 728,5   530 = 198,5 калор. Во второмъ случаѣ это паденіе теплоты не можетъ быть такъ просто вычислено, такъ какъ вслѣдствіе паденія давленія тепловой эквивалентъ $AP\ (v''\quad v')$ развиваемой поршнемъ работы противодавленія значительно уменьшается (ср. гл. 25 и 26).

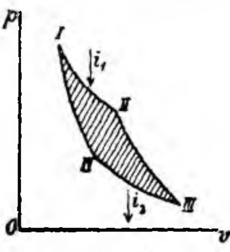
18. Круговой процессъ Карно.

Если какое нибудь газообразное тѣло претерпѣваетъ цѣлый рядъ измѣненій состоянія и наконецъ снова приходитъ въ первоначальное состояніе, то оно совершаетъ круговой процессъ. Кривыя pv и TS такого процесса

образуютъ замкнутые контуры, которые называются діаграммой работы или тепловой діаграммой.

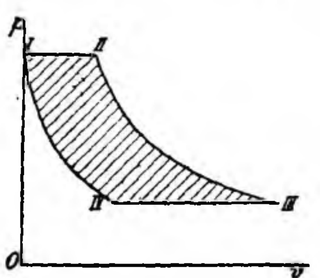
Самый извѣстный изъ круговыхъ процессовъ это процессъ Карно. Въ этомъ процессѣ 1 килогр. газо-





Фиг. 16. Процессъ Карно (тепловая діаграмма и діаграмма $p\,v$).

образнаго тѣла совершаетъ два изотермическихъ и два адіабатическихъ измѣненія своего состоянія, а именно по фиг. 16 въ слѣдующемъ порядкѣ:



Фиг. 17. Процессъ Карно для водяного пара (діаграмма $p\,v$).

1. Изотермическое расширеніе I II при сообщеніи ему теплоты i_1,

2. Адіабатическое расширеніе II III; температура при этомъ падаетъ отъ T_1 до T_2,

3. Изотермическое сжатіе III IV при заимствованіи отъ него теплоты i_2,

4. Адіабатическое сжатіе IV I при этомъ температура повышается отъ T_2 до T_1, и газъ снова приходитъ въ первоначальное состояніе.

Такимъ образомъ при этомъ процессѣ нѣкоторое количество теплоты i_2 переходитъ отъ тѣла съ высшей темпе-

ратурой (продуктовъ горѣнія) къ тѣлу съ низшей температурой (атмосфера или конденсаторъ), при чемъ разность количествъ теплоты $i_1 - i_2$ превращается въ работу. Сообщенное количество теплоты i_1 въ тепловой діаграммѣ изображено всей заштрихованной площадью, заимствованное количество теплоты i_2 изображено просто заштрихованной, а превращенное въ работу количество теплоты $i_1 - i_2$ дважды заштрихованной площадью прямоугольника.

Внѣшняя работа, совершенная во время адіабатическаго расширенія, при сжатіи опять расходуется. Поэтому адіабаты процесса Карно служатъ только для полученія разности температуръ $T_1 - T_2$ или паденія температуры.

Отношеніе превращенной въ работу теплоты ко всему сообщенному количеству ея даетъ термическую степень полезнаго дѣйствія всего процесса

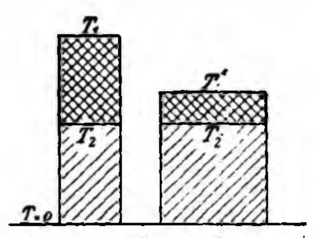
$$\eta = \frac{i_1 - i_2}{i_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Термическая степень полезнаго дѣйствія бываетъ тѣмъ выгоднѣе, чѣмъ больше значеніе T_1 и чѣмъ меньше T_2. При $T_2 = 0$ получается $\eta = 1$, т. е. все сообщенное количество теплоты превратилось бы въ работу, и на каждую единицу теплоты получилась бы работа 427 клгр.-метр. Но случай $T_2 = 0$ на практикѣ не мыслимъ. Какъ крайній нижній предѣлъ для заимствованія теплоты можетъ быть принята температура внѣшняго окружающаго пространства. Поэтому степень полезнаго дѣйствія всегда должна быть меньше 1, т. е. практически отъ 1 теплоты всегда получается меньше 427 килогр.-метр.

Такъ какъ температура T_2 никогда не можетъ быть понижена ниже опредѣленнаго предѣла, то для полученія высокаго значенія η необходимо сообщать теплоту при возможно болѣе высокой температурѣ T_1. Это становится ясно при разсмотрѣніи фиг. 18, которая изобра-

жаетъ двѣ тепловыхъ діаграммы одинаковой площади, но съ различными значеніями энтропіи и паденія температуры. Такъ какъ температура T_2, при которой происходитъ заимствованіе теплоты, въ обоихъ случаяхъ одна и та же, то на діаграммѣ съ большей разностью T_1 T_2 заимствованное количество теплоты (разъ заштрихованная площадь) меньше, и теплота, превращенная въ работу (дважды заштрихованная площадь), поэтому гораздо больше.

Изъ предыдущихъ разсужденій видно, что одно и то же количество теплоты обладаетъ тѣмъ большимъ значеніемъ η, чѣмъ выше температура, при которой оно имѣется въ распоряженіи, или соотвѣтственно чѣмъ меньше его энтропія.



Фиг. 18. Вліяніе паденія температуры на использованіе теплоты.

Теплота съ температурой окружающаго насъ пространства не имѣетъ никакого значенія. Паденіе температуры для тепловыхъ двигателей играетъ такую же роль, какъ паденіе рѣки или ручья для водяныхъ двигателей.

Изъ круговыхъ процессовъ процессъ Карно даетъ наибольшую работу между данными предѣлами температуръ, такъ какъ вся теплота сообщается при наивысшей температурѣ и заимствуется при наинизшей. На практикѣ однако этотъ процессъ въ паровыхъ машинахъ не можетъ быть выполненъ, вслѣдствіе невозможности полученія полнаго расширенія и невозможности сообщенія теплоты при наивысшей данной температурѣ (сравн. главу 38).

Перегрѣваніе пара должно происходить при все возрастающей температурѣ его[1]).

Поэтому процессъ Карно въ настоящее время составляетъ ничто иное, какъ идеальный процессъ.

Въ заключеніе слѣдуетъ еще замѣтить, что въ холодильныхъ машинахъ круговой процессъ происходитъ обратно тому, какъ въ двигателяхъ. При этомъ при израсходованіи работы происходитъ переходъ теплоты отъ тѣла съ болѣе низкой температурой къ тѣлу съ болѣе высокой температурой. Въ то время, какъ переходъ теплоты отъ тѣла съ болѣе низкой температурой къ тѣлу съ болѣе высокой температурой можетъ происходить и безъ совершенія работы, напр., путемъ *лучеиспусканія и теплопроводности*, обратный процессъ безъ производства внѣшней работы не мыслимъ. Поэтому Клаузіусъ формулировалъ полученный результатъ такъ: теплота сама собою никогда не можетъ переходить отъ болѣе холоднаго тѣла къ болѣе теплому. Этотъ законъ считается вторымъ основнымъ закономъ механической теоріи теплоты.

IV. Совершенная машина или машина безъ потерь.

19. Введеніе.

Подъ совершенной машиной или машиной безъ потерь слѣдуетъ подразумѣвать такую, которая не обладаетъ никакими потерями на треніе, обмѣнъ тепла, вредное пространство и т. д. Путемъ сравненія дѣйствительной машины съ совершенной можно получить ясное предста-

[1]) Поэтому машины съ перегрѣтымъ паромъ не могутъ быть оцѣнены по отношенію высшей и низшей температуръ.

вленіе объ использованіи пара. Какъ процессы для сравненія главнымъ образомъ принимаются въ разсчетъ:
1. Процессъ Карно,
2. Процессъ Клаузіуса-Ранкина,
3. Процессъ, принятый О-вомъ Германскихъ Инженеровъ.

Процессъ Карно на основаніи указанныхъ въ заключеніи предыдущей главы причинъ мы здѣсь разсматривать не будемъ. Въ процессѣ Клаузіусъ-Ранкина, какъ и въ процессѣ Карно, полное адіабатическое расширеніе происходитъ вплоть до противодавленія (атмосферы или конденсатора), при чемъ сообщеніемъ теплоты при постоянной температурѣ здѣсь пренебрегается, какъ видно изъ тепловыхъ діаграммъ (фиг. 23 и 24). Поэтому въ термодинамическомъ подогрѣвателѣ питательной воды никакой необходимости не имѣется.

Заимствованіе теплоты въ процессѣ Клаузіусъ-Ранкина происходитъ также при постоянной температурѣ, соотвѣтствующей давленію выпуска.

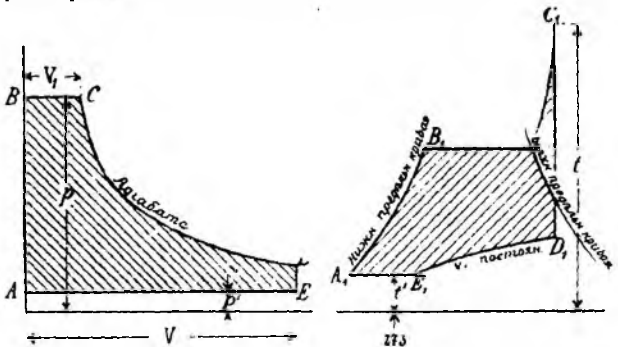
Давленіе выпуска принимается равнымъ давленію атмосферы или конденсатора. Давленіе и температура поступающаго пара измѣряются передъ машиной; вреднаго пространства не имѣется. Затѣмъ предполагается, что питательная вода берется изъ конденсатора и при температурѣ конденсатора вводится въ котелъ.

Діаграмма pv машины, работающей по процессу Клаузіуса-Ранкина, имѣетъ форму $defc$ (фиг. 21). Болѣе подробныя свѣдѣнія объ этомъ процессѣ приведены въ слѣдующихъ главахъ.

Въ процессѣ, принятомъ О-вомъ Германскихъ Инженеровъ, полное расширеніе не принято въ расчетъ, ввиду того, что оно въ дѣйствительности не экономично и никогда не примѣняется (ср. гл. 28). Подтвержденіемъ здѣсь служитъ то обстоятельство, что при полномъ расширеніи

приращеніе вакуума выше опредѣленнаго предѣла имѣетъ своимъ послѣдствіемъ ухудшеніе коэффиціента полезнаго дѣйствія, такъ какъ теоретическая работа возрастаетъ скорѣе, чѣмъ дѣйствительная (ср. гл. 26 и 39).

Поэтому О-во Германскихъ Инженеровъ въ своихъ нормахъ для опредѣленія мощности машинъ предложило такой сравнительный процессъ, при которомъ степень расширенія бываетъ такою-же, какъ и въ дѣйствительной



Фиг. 19. Діаграмма pv и тепловая діаграмма для идеальной машины съ несовершеннымъ расширеніемъ.

машинѣ. При этомъ и здѣсь не принимаются во вниманіе потери на треніе, обмѣнъ теплоты, торможеніе, вредное пространство и т. д. Поэтому діаграмма машины безъ потерь имѣетъ видъ, какъ на фиг. 19.

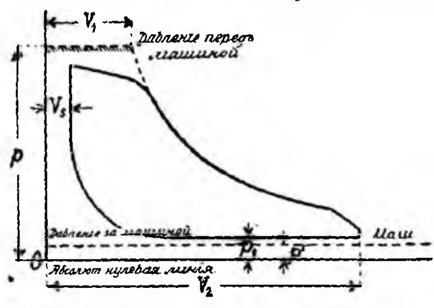
Здѣсь соотвѣтственныя точки діаграммы pv и тепловой діаграммы обозначены одинаковыми буквами.

Для опредѣленія теоретической діаграммы какой-нибудь машины поступаютъ слѣдующимъ образомъ: На индикаторной діаграммѣ разсматриваемой машины (фиг. 20) наносятъ вредное пространство V_s, затѣмъ продолжаютъ

кривую расширенія до пересѣченія съ горизонталью, соотвѣтствующею давленію p непосредственно передъ машиной; тогда V_1 изображаетъ объемъ наполненія, отнесенный къ давленію p. Степень расширенія ε тогда имѣетъ значеніе $\varepsilon = \frac{V_2}{V_1}$.

Для компаундъ-машинъ она составляетъ

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\text{вредное пространство} + \text{объемъ описываемый поршнемъ цилиндра низкаго давленія.}}{\text{вредное пространство} + \text{объемъ, наполненія въ цилиндрѣ высокаго давленія.}}$$



Фиг. 20. Индикаторная діаграмма дѣйствительной машины.

Такимъ образомъ вредное пространство въ этомъ сравнительномъ процессѣ принимается во вниманіе по стольку, поскольку оно вліяетъ на степень расширенія.

Опредѣливши степень расширенія, нетрудно уже начертить теоретическую діаграмму (фиг. 19), при этомъ DE изображаетъ паденіе давленія въ концѣ хода. Коэффиціентъ достоинства η_g машины выражается тогда отношеніемъ дѣйствительно отдаваемой работы N_i къ работѣ N_0 машины безъ потерь

$$\eta_g = \frac{N_i}{N_g} = \frac{D_0}{D_i}.$$

Степень достоинства машины, отнесенная по способу О-ва Германскихъ Инженеровъ къ идеальной машинѣ съ

неполнымъ расширеніемъ, получается больше, нежели отнесенная къ процессу съ полнымъ расширеніемъ.

Въ дальнѣйшемъ подъ идеальной машиной постоянно будемъ понимать машину съ полнымъ расширеніемъ (процессъ Клаузіусъ-Ранкина). Хотя процессъ съ неполнымъ расширеніемъ ближе къ дѣйствительной машинѣ, но за то здѣсь труднѣе вычисленіе теоретической работы.

Въ процессѣ же Клаузіусъ-Ранкина теоретическая работа весьма просто опредѣляется по JS-діаграммѣ. Кромѣ того полученная такимъ образомъ термодинамическая степень полезнаго дѣйствія поршневой машины можетъ быть сравниваема съ термодинамической степенью полезнаго дѣйствія паровой турбины.

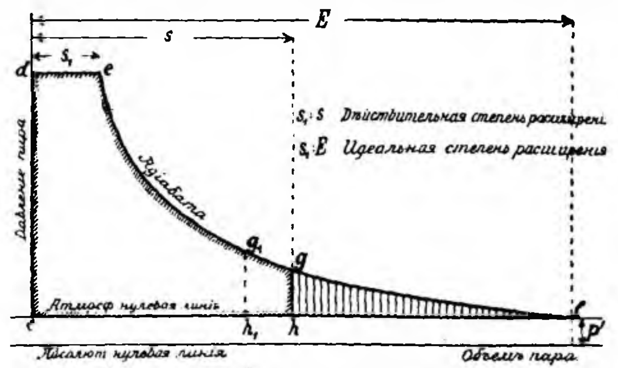
Степень достоинства, отнесенная къ идеальной машинѣ съ неполнымъ расширеніемъ, не даетъ надлежащаго понятія о потеряхъ въ дѣйствительной машинѣ. Съ увеличеніемъ наполненія машины степень достоинства ея увеличивается, такъ какъ потери отъ обмѣна теплоты и торможенія уменьшаются съ наполненіемъ. Для составленія себѣ правильнаго понятія обо всѣхъ потеряхъ необходимо ихъ отнести къ машинѣ съ совершеннымъ расширеніемъ. Степень достоинства только тогда давала-бы правильную картину для сравненія, если бы всегда имѣлось дѣло съ машинами съ одинаковыми конечными давленіями.

Если предпочитаютъ діаграмму съ неполнымъ расширеніемъ, то цѣлесообразно исходитъ отъ конечнаго давленія расширенія[1]), такъ какъ при одинаковомъ расширеніи и работѣ безъ охлажденія при небольшихъ наполненіяхъ можетъ случиться, что теоретическая діаграмма даетъ петлю, т. е. начиная съ опредѣленнаго наполненія и ниже, степень достоинства опять увеличивается.

[1]) На это первый указалъ Гейльманъ въ Z. d. V. d. I. 1906. стр. 319.

20. Индикаторная діаграмма машины безъ потерь. Располагаемая работа.

Индикаторная діаграмма идеальной машины имѣетъ видъ, представленный на фиг. 21. Паръ впускается въ цилиндръ на разстояніи *de*, расширяется адіабатически по линіи *ef* и затѣмъ обратно движущимся поршнемъ

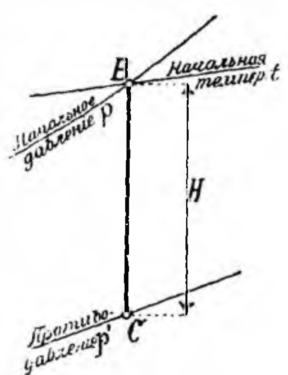


Фиг. 21. Діаграмма давленій (*defc*) машины безъ потерь съ совершеннымъ расширеніемъ (процессъ Клаузіусъ-Ранкина).

выталкивается изъ цилиндра (линія *fc*). Въ разсматриваемомъ случаѣ расширеніе происходитъ до атмосфернаго давленія. Степень расширенія или относительное расширеніе пара выражается отношеніемъ $E : s_1$ между конечнымъ и начальнымъ объемами. При работѣ съ конденсаціей паръ расширяется до давленія въ конденсаторѣ, и поэтому расширеніе бываетъ гораздо больше (ср. гл. 17, примѣръ I).

Работа, совершенная за одинъ ходъ поршня, изображается площадью индикаторной діаграммы. Послѣдняя представляетъ собой работу идеальнаго процесса или такъ называемую располагаемую работу.

Такъ какъ работа идеальной машины соотвѣтствуетъ разности содержанія теплоты въ свѣжемъ парѣ и отработанномъ, то она можетъ быть легко найдена при помощи діаграммы *JS* (фиг. 15). Если изъ точки *B*, соотвѣтствующей начальному состоянію пара (фиг. 22), провести вертикаль *BC* до пересѣченія съ кривой противодавленія, то она изображаетъ собой адіабатическое паденіе теплоты, т. е. измѣряемую въ единицахъ теплоты располагаемую работу. Если, напр., свѣжій паръ имѣетъ давленіе $p = 12$ манометр. атм. и температуру $= 300^0$ C, а давленіе въ конденсаторѣ $= 0{,}1$ атм., то обращаемая въ работу теплота на каждый килогр. пара составляетъ 198,5 калорій. Располагаемая же работа въ килогр.-метр. на 1 килогр. пара будетъ 427.



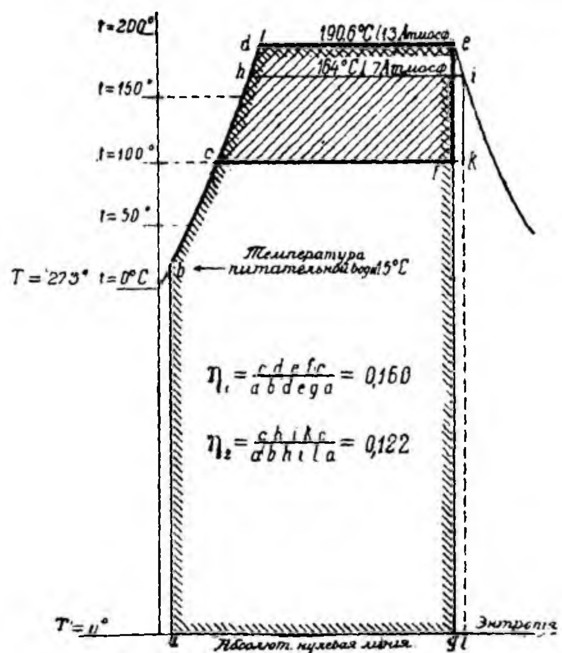
Фиг. 22. Діаграмма Мольє идеальной машины съ совершеннымъ расширеніемъ.

Въ дѣйствительности, сообразно гл. 25, степень расширенія ограничена; большею частью она не превосходитъ 1 : 15 до 1 : 16. При неполномъ расширеніи опредѣленіе работы, получаемой отъ 1 килогр. пара, затруднительно (гл. 25).

Для вычерчиванія діаграммы, соотвѣтствующей дѣйствительной индикаторной діаграммѣ, необходимо знать расходъ пара въ разсматриваемой машинѣ.

21. Тепловая діаграмма машины безъ потерь (идеальной машины).

Чтобы получить представленіе дѣйствія паровой машины, вообразимъ, что паръ образовывается не въ котлѣ,



Фиг. 23. Энтропійная или тепловая діаграмма идеальной машины, работающей насыщеннымъ паромъ (вліяніе давленія пара на термическую степень полезнаго дѣйствія).

а въ самомъ рабочемъ цилиндрѣ. Представимъ себѣ, что въ цилиндрѣ паровой машины сперва находится вода Такъ какъ объемъ ея въ сравненіи съ объемомъ пара

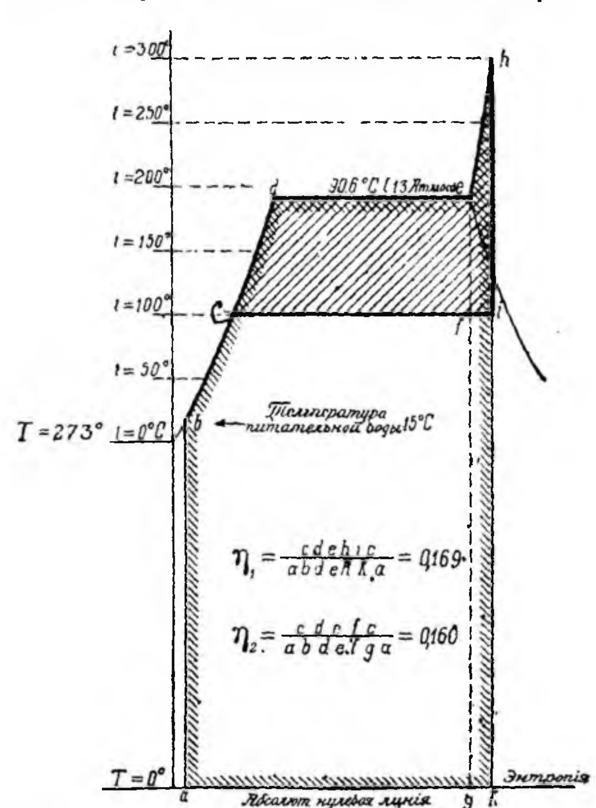
очень незначителенъ, то имъ можно совсѣмъ пренебречь. Температура воды пусть соотвѣтствуетъ температурѣ питанія.

Представимъ себѣ, что водѣ сообщается теплота. При этомъ температура и энтропія ея возрастаютъ сообразно кривой *b d* (фиг. 23). Въ *d* пусть температура достигаетъ 190,6° С, соотвѣтственно 13 абсол. атм. При этой температурѣ происходитъ парообразованіе. Линія энтропіи тогда направлена параллельно оси абсциссъ отъ *d* до *e*. Во время испаренія воды поршень перемѣщается на нѣкоторое разстояніе впередъ и при этомъ совершаетъ работу. Въ идеальной машинѣ на индикаторной діаграммѣ это разстояніе также обозначается черезъ *d e* (фиг. 21).

Притокъ теплоты теперь прекращается, и начинается совершенное адіабатическое расширеніе до противодавленія. Если принять, что имѣемъ *машину безъ конденсаціи*, то паръ расширяется до атмосфернаго давленія, соотвѣтствующаго температурѣ пара въ 100° С. Въ тепловой діаграммѣ этотъ процессъ изображается вертикально (*e f*), а въ діаграммѣ давленій (фиг. 21) адіабатой *e f*.

Теперь начинается выпускъ пара въ атмосферу. Мы при этомъ допустимъ, что заимствованіе теплоты происходитъ въ самомъ цилиндрѣ, а именно такимъ образомъ что при обратномъ ходѣ поршня давленіе и температура пара остаются постоянными. Паръ поэтому соотвѣтственно обратному движенію поршня долженъ обращаться въ жидкость.

Въ тепловой діаграммѣ этотъ процессъ изображается изотермой *f c* (изотермическое сжатіе). Когда поршень достигнетъ конца хода, весь паръ опять обратится въ жидкость (точки *c* въ тепловой діаграммѣ). Такимъ образомъ линія *f c* въ тепловой діаграммѣ соотвѣтствуетъ линіи выпуска *f c* въ діаграммѣ давленій (фиг. 21).



Фиг. 24. Энтропійная или тепловая діаграмма идеальной машины, работающей перегрѣтымъ паромъ (вліяніе перегрѣва на термическую степень полезнаго дѣйствія).

Процессъ сообщенія теплоты можетъ снова возобновиться. Въ дѣйствительности же необходимо имѣть въ виду, что отработавшій въ паровой машинѣ паръ въ видѣ

питательной воды опять долженъ поступать въ котелъ. Поэтому для полученія вѣрной картины сообщенія и заимствованія теплоты необходимо находящуюся въ цилиндрѣ воду охладить до температуры питанія. При этомъ на тепловой діаграммѣ получается линія $c\,b$. Затѣмъ процессъ притока теплоты, а также испаренія и совершенія работы можетъ начинаться снова.

Тепловая діаграмма (фиг. 23) начерчена для машины безъ конденсаціи и работающей насыщеннымъ паромъ, при чемъ принято, что въ началѣ расширенія, (точкѣ c на тепловой діаграммѣ) паръ находится въ сухомъ насыщенномъ состояніи. Отдѣльныя линіи тепловой діаграммы вычерчены толстыми линіями. Величина заштрихованной площади $cdef$ изображаетъ собой количество теплоты, превращенной въ идеальной машинѣ въ работу, соотвѣтственно адіабатическому паденію тепла въ діаграммѣ JS.

При конденсаціи заимствованіе теплоты происходитъ при болѣе низкой температурѣ, и линія fc располагается соотвѣтственно ниже.

Если паръ перегрѣвается, то получается тепловая діаграмма, изображенная на фиг. 24. До точки e существуетъ полная согласованность этой діаграммы съ діаграммой для насыщеннаго пара; $e\,h$ представляетъ энтропійную линію перегрѣва; $h\,i$ — адіабатическое расширеніе и $i\,c$ — энтропійную линію выпуска. Площадь опять даетъ намъ располагаемую работу, измѣренную въ единицахъ теплоты.

22. Сообщаемыя и заимствуемыя количества теплоты.

Количества теплоты, требуемыя для нагрѣва воды, испаренія и перегрѣва уже разсмотрѣны въ гл. 15 при помощи

фиг. 11. На фиг. 23 температура питательной воды принята равной 15⁰ С. Поэтому сообщеніе теплоты начинается съ точки *b*. Расположенная подъ линіей *b d* площадь соотвѣтствуетъ потребному для нагрѣванія воды количеству теплоты. Расположенная подъ линіей *d e* площадь соотвѣтствуетъ теплотѣ испаренія. Поэтому общее количество теплоты изображается площадью *a b d e g a*.

Въ точкѣ *f* начинается заимствованіе теплоты, причемъ отъ *f* до *c* заимствуется теплота пара, а отъ *c* до *b* теплота жидкости. Поэтому все отведенное въ теченіе рабочаго процесса количество теплоты изображается площадью *a b c f g a*.

Если бы температура питательной воды была 50⁰, то количество какъ сообщенной, такъ и заимствованной теплоты было бы соотвѣтственно меньше.

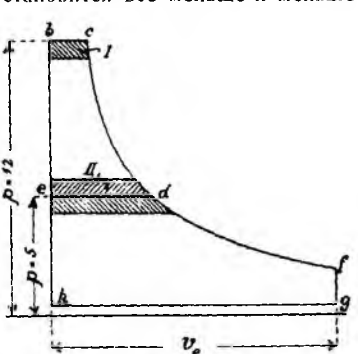
Если паръ перегрѣвается, то необходимо еще расходовать теплоту перегрѣва, которое на фиг. 24 изображается площадью подъ линіей *e h*. Поэтому все сообщенное количество теплоты изображается площадью *a b d e h k a*, а заимствованное количество теплоты площадью *a b c i k a*. Послѣднее количество теплоты при работѣ безъ конденсаціи уходитъ въ атмосферу, а при работѣ съ конденсаціей заимствованная теплота сообщается охлаждающей водѣ (ср. также примѣръ гл. 27).

Разность между сообщеннымъ и заимствованнымъ количествами теплоты соотвѣтствуетъ располагаемой работѣ.

Опредѣленіе сообщеннаго и заимствованнаго количества теплоты легче всего производится при помощи діаграммы *JS* (фиг. 15). При этомъ требуется только опредѣлить соотвѣтственныя ординаты.

23. Польза высокихъ давленій впуска.

Преимущества высокаго давленія видны изъ діаграммы pv (фиг. 25). Путемъ увеличенія давленія пара отъ $p = 5$ до $p = 12$ атм. пріобрѣтается площадь работы $d\,e\,b\,c$; при этомъ излишній расходъ теплоты на 1 килогр. питательной воды составляетъ только 10 калорій. Кромѣ того нетрудно видѣть, что при дальнѣйшемъ повышеніи давленія пара выигрышъ работы становится все меньше и меньше вслѣдствіе уменьшенія объема пара.



Фиг. 25. Діаграмма давленій (выигрышъ работы путемъ повышенія рабочаго давленія).

Къ такому же заключенію можно придти и на основаніи тепловой діаграммы. На фиг. 23 начерчена вторая діаграмма для давленія впуска 7 абсолют. атм. Изъ начерченной въ масштабѣ фигуры ясно видно, что работа, изображенная площадью $c\,h\,i\,k\,c$, гораздо меньше работы при 13 абсол. атм. Такъ какъ при этомъ количество отведенной теплоты на величину площади $g\,f\,k\,l\,g$ больше, то термическая степень полезнаго дѣйствія соотвѣтственно уменьшается.

На фиг. 23 термическая степень полезн. дѣйствія, какъ для 13 атм., такъ и для 7 атм. была опредѣлена путемъ планиметрированія соотвѣтственныхъ площадей. При этомъ была найдена степень полезнаго дѣйствія η_1 для 13 атм. равной 0,160, а для 7 атм. $\eta_2 = 0{,}122$. Термическая

степень полезнаго дѣйствія при увеличеніи давленія повысилась на 3,8%, соотвѣтственно уменьшенію расход теплоты машиной на 23,8%.

Тотъ же результатъ получается и изъ діаграммы JS Отсюда опять видно, что сообщеніе теплоты должно совершиться при возможно болѣе высокой температурѣ или соотвѣтственно при возможно меньшей энтропіи Чѣмъ больше энтропія, тѣмъ невыгоднѣе бываетъ использованіе теплоты. Отсюда ясно, что регулированіе паровой машины путемъ торможенія свѣжаго пара въ термическомъ отношеніи весьма нераціонально, такъ какъ при такомъ регулированіи давленіе пара тѣмъ болѣе понижается, чѣмъ меньше производимая работа. Хотя при торможеніи свѣжаго пара содержаніе въ немъ теплоты остается неизмѣннымъ, такъ какъ паръ при этомъ осушается или даже перегрѣвается, но энтропія увеличивается, т. е. тепловая діаграмма болѣе вытягивается, и площадь ея уменьшается (ср. также гл. 39).

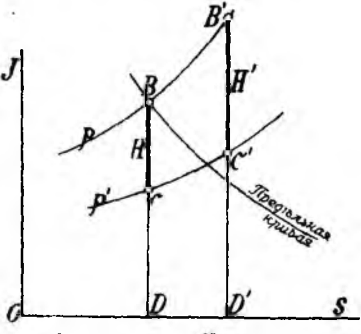
24. Польза перегрѣва пара.

Если бы на фиг. 24 работа производилась безъ перегрѣва, то тепловая діаграмма была бы изображена площадью $c\,d\,e\,f\,c$, между тѣмъ какъ при перегрѣвѣ получается площадь $c\,d\,e\,h\,i\,c$. Послѣдняя площадь больше первой на величину $f\,e\,h\,i\,f$, но и сообщенное количество теплоты также больше на величину площади $d\,e\,h\,k\,g$.

Опредѣляя теперь термическую степень полезнаго дѣйствія, находимъ ее для перегрѣтаго пара 0,169[1]), а для насыщеннаго 0,160. Такимъ образомъ путемъ перегрѣва до 300° C термическая степень полезнаго дѣйствія повышается на 0,9%, и соотвѣтственно расходъ теплоты умень-

[1]) Ср. примѣръ I гл. 27.

шается на 5,3%. При этомъ слѣдуетъ замѣтить, что сказанное относится только къ идеальному процессу въ машинѣ, т. е. 0,9% составляетъ теоретическое улучшеніе. Въ дѣйствительности-же улучшеніе процесса работы машины гораздо больше въ виду обмѣна теплоты (ср. гл. 34). Полученный здѣсь незначительный теоретическій выигрышъ былъ бы недостаточнымъ для оправданія примѣненія перегрѣтаго пара.



Фиг. 26. Теоретическій выигрышъ отъ перегрѣва пара.

При низкихъ давленіяхъ пара вліяніе перегрѣва больше, чѣмъ при высокихъ давленіяхъ, т. е. процентное преимущество перегрѣтаго пара уменьшается съ увеличеніемъ давленія. Впрочемъ это ясно видно изъ разсмотрѣнія тепловой діаграммы (фиг. 24). Чѣмъ ниже давленіе пара, т. е. чѣмъ отложе идетъ тепловая діаграмма, тѣмъ больше бываетъ выигранная путемъ перегрѣва площадь по отношенію къ площади *c d e f c*. На этомъ основаніи относительная польза примѣненія перегрѣтаго пара при работѣ безъ конденсаціи бываетъ больше, чѣмъ при работѣ съ конденсаціей.

Эти взаимоотношенія весьма удобно могутъ быть прослѣжены съ помощью діаграммы *JS* (фиг. 26). Хотя адіабатическое паденіе теплоты *H'* при перегрѣтомъ парѣ больше, чѣмъ при насыщенномъ, гдѣ оно только равно *H*, тѣмъ не менѣе было бы неправильно судить объ улучшеніи процесса работы только по паденію содержанія теплоты, такъ

какъ при перегрѣтомъ парѣ и сообщенное количество теплоты $B' D'$ больше, чѣмъ при насыщенномъ ($B D$) Этимъ объясняется незначительная теоретическая польза перегрѣва.

Изъ діаграммы JS можно еще видѣть, что вліяніе перегрѣва на термическую степень полезнаго дѣйствія больше при работѣ безъ конденсаціи, нежели при работѣ съ конденсаціей.

Что касается расхода пара, то онъ путемъ перегрѣва уменьшается. При идеальной машинѣ расходъ пара на лошад. силу-часъ уменьшился бы въ томъ же отношеніи, въ какомъ возрастаетъ адіабатическое паденіе теплоты. Такимъ образомъ для опредѣленія соотношенія расходовъ пара при двухъ различныхъ давленіяхъ и перегрѣвахъ слѣдуетъ, согласно гл. 27 примѣръ III, опредѣлить соотношеніе паденій теплоты, полученныхъ по діаграммѣ JS. Для дѣйствительныхъ машинъ можно принять, что при температурахъ между 280 и 320° C на каждые 6° C перегрѣва сберегается 1% пара въ предположеніи нормальнаго давленія пара въ 12 абсолют. атм. Съ увеличеніемъ перегрѣва процентное сбереженіе уменьшается.

Въ заключеніе слѣдуетъ замѣтить, что для дѣйствительной машины необходимо принять въ разсчетъ еще и дальнѣйшее преимущество перегрѣтаго пара, а именно меньшее сопротивленіе движенію, а также меньшую потерю отъ несовершеннаго расширенія.

Послѣднее обусловливается тѣмъ, что кривая расширенія для перегрѣтаго пара понижается сильнѣе, чѣмъ для насыщеннаго, такъ что при перегрѣтомъ парѣ получаются меньшія расширенія.

25. Полное и неполное расширеніе.

Въ то время какъ въ совершенной машинѣ расширеніе продолжается до противодавленія p', въ дѣйствительной машинѣ только часть энергіи расширенія пара можетъ быть использовано[1]). Вслѣдствіе неполнаго расширенія діаграмма давленіи въ концѣ хода поршня не имѣетъ заостренія. Расширеніе, наоборотъ прекращается въ точкѣ g (фиг. 21), и заимствованіе теплоты происходитъ тогда при постоянномъ объемѣ. При этомъ въ діаграммѣ давленій теряется треугольникъ gfh. Если же расширеніе происходитъ только до точки g_1, то площадь потери бываетъ еще больше.

Фиг. 27. Теоретическая потеря отъ неполнаго расширенія (потери въ отработавшемъ парѣ).

То же самое получается при помощи тепловой діаграммы. На фигурѣ 27 при полномъ расширеніи было бы использовано количество теплоты $cdefc$. Если же адіабатическое расширеніе прекращается уже въ точкѣ g, тогда теряется количество теплоты, изображенное площадью dfh. Это количество теплоты безполезно уходитъ въ атмосферу или въ холодильную воду конденсатора. Если расширеніе продолжается только до точки g, то площадь потерь равна g_1fh_1. Кривой выпуска hc на индикаторной діаграммѣ соотвѣтствуетъ изотерма hc въ тепловой

[1]) Ср. главы 19 и 28.

діаграммѣ. Если энергія расширенія пара мало или совершенно не использовывается, какъ это имѣетъ мѣсто въ машинахъ безъ расширенія, то теряется площадь efh_2 т. е. только небольшая часть заключающейся въ парѣ энергіи превращается въ работу. Отсюда слѣдуетъ, что машины безъ расширенія работаютъ неэкономично, и поэтому ихъ строятъ только въ видѣ мелкихъ двигателей съ регулировкой торможеніемъ, а въ другихъ случаяхъ примѣняются исключительно машины съ расширеніемъ. При этомъ стремятся расширеніе продолжать настолько, насколько это практически оказывается цѣлесообразнымъ для уменьшенія по возможности потерь отъ неполнаго расширенія.

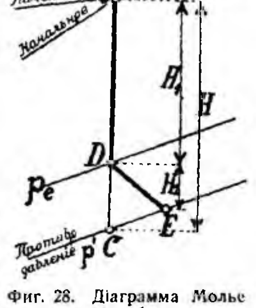
Въ цилиндрахъ высокаго давленія компаундъ-машинъ, какъ это видно изъ фиг. 58, неполное расширеніе менѣе убыточно. Паденіе давленія въ цилиндрѣ высокаго давленія вызываетъ только потерю V_1, которая вслѣдствіе быстраго паденія кривой расширенія очень незначительна въ сравненіи съ площадью потери V_2 въ цилиндрѣ низкаго давленія. Къ тому еще дѣйствительная потеря въ цилиндрѣ высокаго давленія оказывается меньше V_1, такъ какъ паденія давленія, какъ всякій процессъ торможенія, вызываетъ осушеніе или перегрѣвъ пара, используемые въ цилиндрѣ низкаго давленія (гл. 29).

Что касается кривыхъ gh, $g_1 h_1$ и т. д. въ тепловой діаграммѣ (фиг. 27), то онѣ представляютъ собой кривыя постояннаго удѣльнаго объема. Хота въ концѣ расширенія происходитъ выпускъ пара въ атмосферу или въ конденсаторъ, но, согласно сказанному въ главѣ 21 принимаютъ, что заимствованіе теплоты въ рабочемъ цилиндрѣ происходитъ такимъ образомъ, что паръ сгущается по мѣрѣ уменьшенія его давленія. Такъ какъ во время паденія давленія пара gh (фиг. 21) поршень остается въ

мертвомъ положеніи, то измѣненіе состоянія пара происходитъ при постоянномъ объемѣ.

Опредѣленіе количества работы, получаемой отъ 1 килогр. пара при несовершенномъ расширеніи, можетъ быть произведено путемъ вычисленія на основаніи уравненій теоріи теплоты. Однако это вычисленіе для перегрѣтаго пара требуетъ много времени; гораздо скорѣе цѣль достигается при помощи діаграммы JS, какъ показываетъ примѣръ III.

Примѣръ I. Пусть паровая машина съ конденсаціей работаетъ паромъ съ давленіемъ 12 атм. маном. и 300° C; давленіе въ конденсаторѣ равно 0,1 атм. Опредѣлить относительное расширеніе при полномъ и неполномъ расширеніяхъ, если конечныя давленія будутъ $p_e = 0,7$, $0,5$ и $0,4$ атм.



Фиг. 28. Діаграмма Молье для машины безъ потерь съ несовершеннымъ расширеніемъ.

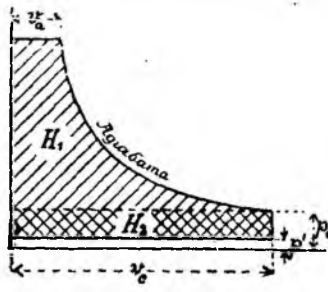
При совершенномъ адіабатическомъ расширеніи относительное расширеніе, согласно гл. 17, примѣру I, составляетъ 1 : 63,5. При несовершенномъ расширеніи получаются удѣльные объемы въ концѣ расширенія для $p_e = 0,7$ атмосфер. $v_e = 2,23$; для $p_e = 0,5$ атм. $v_e = 3,0$ и для $p_e = 0,4$ атм. $v_e = 3,7$. Такъ какъ удѣльный объемъ свѣжаго пара составляетъ 0,2 куб. мет., то соотвѣтственныя относительныя расширенія будутъ 1 : 11,15, 1 : 15 и 1 : 18,5.

Примѣръ II. Опредѣлить количество пара, поступающаго въ конденсаторъ при несовершенномъ расширеніи, если относительное расширеніе составляетъ 1 : 16.

Начальное давленіе пара $p = 12$ абсол. атм., температура $t = 300°$ C и $p' = 0,1$ атм.

При шестнадцатикратномъ расширеніи, какъ видно изъ послѣдняго примѣра, конечное давленіе пара колеблется между 0,4 и 0,5 атм. Если бы паръ расширился до да-

вленія конденсатора въ 0,1 атм., то согласно примѣру 1 гл. 17, объемъ цилиндра долженъ былъ бы быть въ 63,5 раза больше объема наполненія. Но такъ какъ объемъ цилиндра только въ 16 разъ больше объема наполненія, т. е. почти только въ $^1/_4$ отъ 63,5, то въ концѣ хода поршня около 75% рабочаго пара уходитъ въ конденсаторъ. Отсюда видно, что большая часть пара уходитъ изъ цилиндра уже у конца хода поршня, т. е. во время опереженія выпуска, и только незначительная часть пара уходитъ во время выталкивающаго хода. Поэтому при дѣйствительной машинѣ необходимо обратить серьезное вниманіе на достаточное предвареніе выпуска, такъ какъ въ противномъ случаѣ паръ въ концѣ хода поршня имѣетъ слишкомъ мало времени для выхода. Слѣдствіемъ этого явилось бы повышенное противодавленіе на поршень.



Фиг. 29. Теоретическая работа при несовершенномъ расширеніи.

Хотя въ концѣ хода поршня паръ поступаетъ въ конденсаторъ съ давленіемъ въ конденсаторѣ p', но не съ той малой скоростью, которая сообщается ему обратно движущимся поршнемъ, а съ гораздо большей скоростью выпуска, которая сообщается ему избыткомъ давленія p_e p'. Эта энергія выпуска теряется для машины.

Примѣръ III. Опредѣлить теоретическую работу, которая можетъ быть развита 1 килограммомъ пара давленіемъ въ 12 маном, атм. и 300° C при несовершенномъ расширеніи до $p_e = 0{,}5$ атм., если давленіе въ конденсаторѣ $p' = 0{,}1$ атм.? Какова будетъ потеря отъ несовершеннаго расширенія?

При совершенномъ расширеніи тепловое значеніе располагаемой работы равно адіабатическому паденію теплоты H на фиг. 28; послѣднее можетъ быть получено изъ діаграммы JS и составляетъ 198,7 калорій.

При несовершенномъ расширеніи развиваемая работа состоитъ изъ обѣихъ заштрихованныхъ площадей (фиг. 29). Величина разъ заштрихованной площади соотвѣтствуетъ адіабатическому паденію теплоты H_1 на фиг. 28, которое получается изъ діаграммы JS и составляетъ 146 калорій. Величина дважды заштрихованной площади прямоугольника соотвѣтствуетъ паденію теплоты H_2 и получается

$$H_2 = \frac{(p_e - p') \cdot v_e \cdot 10000}{427} = \frac{(0{,}5 - 0{,}1) \cdot 3 \cdot 10000}{427} = 28{,}1 \text{ клр.}$$

Слѣдовательно, вся работа въ единицѣ теплоты при несовершенномъ расширеніи составляетъ

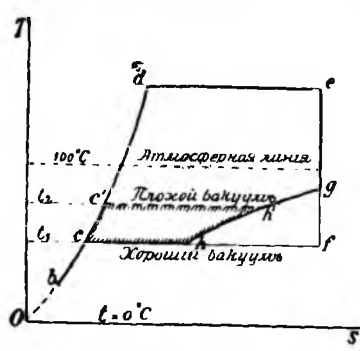
$$H_1 + H_2 = 146 + 28{,}1 = 174{,}1 \text{ калорій.}$$

Потеря вслѣдствіе несовершеннаго расширенія составляетъ $198{,}7 - 174{,}1 = 24{,}6$ калорій.

Къ такому же результату можно притти и другимъ путемъ. Работа, совершаемая поршнемъ для преодолѣнія противодавленія при полномъ расширеніи до 0,1 атм., составляетъ по таблицѣ для пара 34,94 калор. Но вслѣдствіе несовершеннаго расширенія эта работа будетъ меньше въ отношеніи $v_e : v_0$, гдѣ v_0 удѣльный объемъ пара при совершенномъ расширеніи. Такъ какъ $v_e : v_0 = 3 : 12{,}7 = 1 : 4{,}23$, то работа противодавленія будетъ только $34{,}94 : 4{,}23 = 8{,}26$ калор. Если бы противодавленіе было $p_e = 0{,}5$ атм. (разъ заштрихованная площадь), то работа противодавленія согласно таблицѣ для пара была бы равна 38,56 калор. Поэтому путемъ пониженія противодавленія до 0,1 атм. выигрывается работа $38{,}56 - 8{,}26 = 30{,}30$ калор. Этому значенію приблизительно соотвѣтствуетъ выше вычисленное значеніе H_2. Не вполнѣ точное совпаденіе полученныхъ чиселъ обусловливается тѣмъ, что не была принята во вниманіе влажность пара. Умноживъ полученныя изъ таблицы для пара значенія внѣшней теплоты парообразованія на величину x для даннаго случая, получаютъ совершенно такія же значенія, какъ раньше.

26. Польза конденсаціи.

У машинъ безъ конденсаціи заимствованіе теплоты происходитъ при атмосферномъ давленіи, т. е. при 100° С. При машинѣ же съ конденсаціей противодавленіе гораздо меньше атмосфернаго, слѣдствіемъ этого является выигрышъ работы или теплоты, т. е. площади діаграммы давленій и тепловой діаграммы получаются больше нежели при работѣ безъ конденсаціи на величину уменьшенія противодавленія.



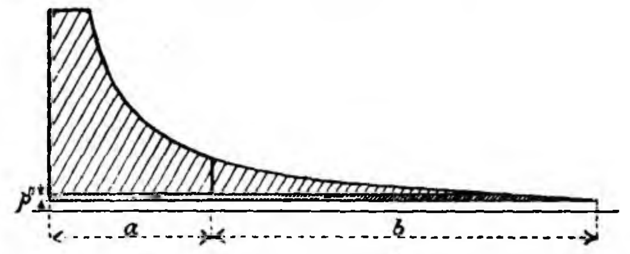
Фиг. 30. Потери отъ плохого вакуума.

При температурѣ t_1 въ конденсаторѣ тепловая діаграмма при несовершенномъ расширеніи имѣетъ видъ *cdeghc* (фиг. 30). Если имѣется плохой вакуумъ и температура въ конденсаторѣ составляетъ t_2, то теряется еще окаймленная площадь $c'\,h'\,h\,c$. Поэтому цѣлесообразно работать съ возможно болѣе высокимъ вакуумомъ.

Фиг. 31. Выигрышъ въ работѣ отъ улучшенія вакуума.

Достигаемый благодаря паденію противодавленія на величину p'' выигрышъ въ работѣ выражается на фиг. 31

заштрихованной площадью. Если напримѣръ средне-индикаторное давленiе $p_i = 3$ атм., то при улучшенiи вакуума на 0,05 атм. индикаторная работа увеличилась бы на 1,7%. Въ такомъ же процентномъ отношенiи уменьшается расходъ пара машиной. Двойному уменьшенiю давленiя соотвѣтствовалъ бы вдвое большiй выигрышъ работы. Совершенно иныя условiя будутъ у машины съ совершеннымъ расширенiемъ (фиг. 32). Такъ какъ объемъ пара при уменьшенiи давленiя очень



Фиг. 32. Выигрышъ работы отъ увеличенiя вакуума при совершенномъ и несовершенномъ расширенiяхъ.

скоро возрастаетъ, то площадь дiаграммы возрастаетъ тѣмъ больше, чѣмъ ниже будетъ сдѣлано p'. Это видно также и изъ дiаграммы JS; адiабатическое паденiе теплоты быстро возрастаетъ съ пониженiемъ p'.

Но такъ какъ дѣйствительная машина можетъ использовать только часть a заштрихованной полоски площади на фиг. 32, то нетрудно видѣть, что относительный выигрышъ работы съ возрастанiемъ вакуума постоянно уменьшается. Это обстоятельство, а также соображенiе о расходѣ работы и стоимости конденсацiи выясняютъ причину, по которой при поршневыхъ машинахъ не дѣлаютъ вакуума больше 85 90%.

Выигрышъ работы отъ конденсацiи можетъ быть вычисленъ сообразно гл. 25 прим. III.

Примѣръ: Машина безъ конденсацiи, въ которой паръ давленiемъ въ 12 маном. атм. и 300° С. расширяется до атмосфернаго давленiя, присоединяется къ конденсатору. Какой будетъ теоретическiй выигрышъ работы при давленiи въ конденсаторѣ $p' = 0{,}1$ атм.?

Согласно примѣру I гл. 17 удѣльный объемъ пара въ концѣ расширенiя будетъ $v_e = 1{,}62$, а относительное расширенiе 1 : 8,1. Отсюда достигаемое при конденсацiи увеличенiе работы въ единицахъ тепла будетъ

$$H_2 = \frac{(1{,}0 - 0{,}1) \cdot 1{,}62 \cdot 10000}{427} = 34{,}2 \text{ калор.}$$

Такъ какъ располагаемая работа безъ конденсацiи составляетъ $H_1 = 121$ калор., то увеличенiе работы машины при устройствѣ конденсацiи будетъ 28%.

27. Термическая степень полезнаго дѣйствiя и расходъ пара въ идеальной машинѣ.

Подъ термической степенью или коэффицiентомъ полезнаго дѣйствiя машинъ безъ потерь слѣдуетъ понимать отношенiе располагаемой работы къ сообщенной теплотѣ. Проще всего вычисляется она по дiаграммѣ *JS*. При этомъ необходимо опредѣлить адiабатическое паденiе теплоты и раздѣлить его на расходъ теплоты на 1 килогр. пара. Если исходить изъ несовершеннаго расширенiя, то вычисленiе термической степени полезн. дѣйствiя уже не такъ просто (ср. выводы въ гл. 25).

Термическая степень полезнаго дѣйствiя можетъ быть также опредѣлена при помощи тепловой дiаграммы, при чемъ площадь этой дiаграммы слѣдуетъ раздѣлить на площадь сообщенной теплоты, какъ произведено на фиг. 23 24.

Однако такой способъ опредѣленія представляетъ собой окольный путь.

Что касается расхода пара въ идеальной машинѣ, то скорѣе всего онъ опредѣляется изъ діаграммы JS. Для этого слѣдуетъ опредѣлить адіабатическое паденіе теплоты и раздѣлить его на 632,3. Значеніе частнаго $D = 632{,}3 : H$ прямо даетъ расходъ пара въ килогр. на лошад. силу-часъ.

При дѣйствительной машинѣ расходъ пара опредѣляется только опытнымъ путемъ, т. е. на основаніи чиселъ, полученныхъ при опытахъ, такъ какъ здѣсь онъ находится въ зависимости не только отъ величины машины, но также и отъ конечнаго давленія при расширеніи, обмѣна теплоты и отъ многихъ другихъ факторовъ.

Примѣръ I. Пусть идеальная машина безъ охлажденія работаетъ паромъ 12 атм. и 300° C. Паръ оставляетъ машину при атмосферномъ давленіи. Температура питательной воды $t_w = 15^0$ C. Опредѣлить термическую степень полезн. дѣйствія и расходъ пара машиной.

Превращенное въ работу количество теплоты равно количеству теплоты, сообщенной свѣжими парами безъ количества теплоты, уносимаго выпускаемыми парами, т. е. $A \cdot L_i = G\,(i'' - t_w) - G(i'_a + x_a \cdot r_a - t_w)$[1].

Для дѣйствительной машины слѣдуетъ еще вычесть теплоту, отданную стѣнками (потери отъ теплопроводности и лучеиспусканія).

Въ предыдущемъ уравненіи означаютъ L_i индикаторную работу въ килогр.-метрахъ, G — расходъ пара въ килогр., i'_a — теплоту жидкости, x_a — относительное количество пара и r_a — теплоту парообразованія уходящаго изъ цилиндра пара[2].

[1]) Это уравненіе можетъ быть написано проще: $A \cdot L_i = G\,(i'' - i''_a)$, гдѣ i''_a — содержаніе тепла въ выпускаемомъ парѣ.

[2]) Часто вмѣсто r_a вставляется внутренняя теплота парообразованія ρ_a. Но это невѣрно, такъ какъ здѣсь не принятъ въ расчетъ тепловой эквивалентъ производимой поршнемъ работы противодавленія $AP(v'' - v')$ при выталкивающемъ ходѣ.

Если паръ 13 атм. и 300° С. расширяется адiабатически до атмосфернаго давленiя, то (по гл. 17 прим. I) относительное количество пара въ концѣ расширенiя получается $x_a = 0{,}943$, а слѣд. влажность пара получается 5,7%. Поэтому выдѣленiе теплоты на каждый килогр. пара составляетъ

$$99{,}6 + 0{,}943 \cdot 539{,}7 - 15 = 593{,}5 \text{ калор.}$$

Такъ какъ сообщенное количество теплоты составляетъ 729 — 15 = 714 калор., то превращается въ работу съ каждаго килогр. пара 714 — 593,5 = 120,5 калор. Поэтому термическая степень полезнаго дѣйствiя составляетъ $\frac{120{,}5}{714} = 0{,}169$.

Расходъ пара на лош. силу-часъ составляетъ

$$632{,}3 : 120{,}5 = 5{,}25 \text{ килогр.}$$

Такiе же результаты получаются гораздо скорѣе помощью дiаграммы JS.

Примѣръ II. Пусть идеальная машина съ конденсацiей работаетъ паромъ съ давленiемъ 12 маном. атм и 300° С. Паръ оставляетъ машину при давленiи въ конденсатора въ 0,1 абс. атм. Температура питательной воды $t_w = 15°$ С. Оредѣлить термическую степень полезнаго дѣйствiя и расходъ пара.

Пусть для индикаторной работы L_i килогр метр. требуется G килогр. пара и G_k килогр. охлаждающей воды. Если обозначимъ черезъ i_k и i_c теплоты жидкости, соотвѣтствующiя температурѣ охлаждающей воды и температурѣ въ конденсаторѣ, получается

$$A \cdot L_i = G(i'' - t_w) - G(i_c - t_w) - G_k(i_c - i_k).$$

Здѣсь обозначаютъ $G(i' - t_w)$ количество теплоты сообщенной и $G(i_c - t_w)$ количество теплоты заимствованной рабочимъ веществомъ, $G_k(i_c - i_k)$ теплота, поглощенная охлаждающей водой. Здѣсь также не принята во вниманiе отдача теплоты черезъ стѣнки, такъ какъ для идеальной машины предполагаются теплонепроницаемыя стѣнки.

Затѣмъ для вычисленiя термической степени полезн. дѣйствiя и расхода пара необходимо предварительно сдѣлать допущенiе относительно температуры охлаждающей

воды и опредѣлитъ количество ея. Эту задачу можно рѣшить такъ же, какъ въ примѣрѣ I. Приведенное тамъ уравненіе можетъ служить и здѣсь[1]).

Гораздо проще этотъ расчетъ производится при помощи діаграммы JS. Адіабатическое паденіе теплоты опредѣляется при этомъ въ 198,7 килогр., термическая степень полезн. дѣйствія = 27,8% и расходъ пара на лош. силу-часъ составляетъ $\frac{632,3}{198.7} = 3,18$ килогр.

Примѣръ III. Пусть расходъ пара машиной при начальномъ давленіи въ 11 маном. атмосферъ и температурѣ 280° С. приблизительно составляетъ 5,5 кгр. на лош. силу-часъ. Опредѣлить расходъ пара при давленіи 12 маном. атмосф. и $t = 300°$ С. Давленіе выпуска въ обоихъ случаяхъ равно $p' = 0,1$ абсол. атм.

Адіабатическое паденіе теплоты при 11 абс. атм. и 280° С по діаграммѣ JS составляетъ 192 калор.; при 12 атм. и 300° С. получается 198,7 калор. Оба эти значенія расхода пара относятся между собою обратно пропорціонально адіабатическому паденію теплоты, и такимъ образомъ искомый расходъ пара составляетъ $5,5 \frac{192}{198,7} = 5,32$ кгр.

Такъ какъ при пріемочныхъ испытаніяхъ часто случается, что температура пара передъ машиной, принятая въ основаніе гарантіи, не достигается, то измѣренный расходъ пара вычисляется по отношенію адіабатическаго паденія теплоты. Но это допустимо только для небольшихъ разницъ температуръ и то только для одинаковаго давленія выпуска. Если рѣчь идетъ о большихъ разностяхъ температуръ и если еще приходится вести расчетъ на другое давленіе въ конденсаторѣ, то нужно принять во вниманіе измѣненіе термодинамической степени полезн. дѣйствія. Измѣненія послѣдней при постоянныхъ обмѣнѣ теплоты, потерѣ отъ торможенія и неплотностей происходятъ отъ того, что потеря отъ несовершеннаго расширенія здѣсь бываетъ совершенно другая (сравнить главу 26 и 39).

[1]) Обѣ выноски въ послѣднемъ примѣрѣ сохраняютъ свою силу и здѣсь.

При перечетѣ расхода пара для выполненныхъ машинъ при работѣ ихъ при другихъ температурѣ и давленіи слѣдуетъ принять во вниманіе, что парораспредѣлительные органы при болѣе высокихъ температурахъ иногда бываютъ менѣе плотны, чѣмъ при низкихъ, такъ что расчитанное сбереженіе пара въ дѣйствительности или вовсе не имѣетъ мѣста или имѣетъ мѣсто только отчасти.

V. Дѣйствительная машина.

28. Индикаторная діаграмма дѣйствительной машины.

Дѣйствительная машина не можетъ быть выполнена безъ нѣкотораго вреднаго пространства; кромѣ того она всегда работаетъ съ неполнымъ расширеніемъ. Заостреніе въ діаграммѣ встрѣчается въ крайнемъ случаѣ только при машинахъ безъ конденсаціи. Въ машинахъ съ конденсаціей степень расширенія рѣдко превосходитъ 1 : 16. Заостреніе, т. е. совершенное расширеніе неблагопріятно отражалось бы здѣсь на расходѣ пара ввиду обмѣна теплоты и потери на треніе (см. главу 34). Поэтому конечное давленіе расширенія никогда не дѣлаютъ ниже опредѣленнаго предѣла, обусловливаемаго соображеніями возможной экономичности. Подробнѣе объ этомъ см. томъ II, главу 6, 8, 14.

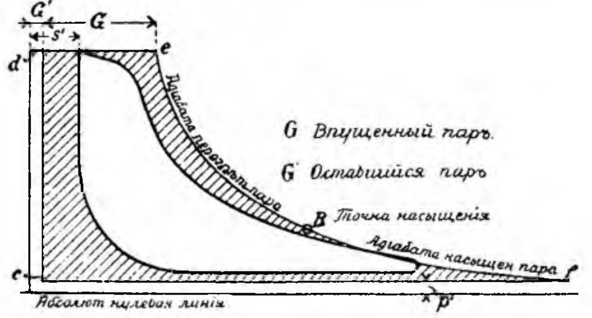


Фиг. 33. Индикаторная діаграмма дѣйствительной машины.

Фигура 33 изображаетъ индикаторную діаграмму дѣйствительной машины. Вслѣдствіе неизбѣжныхъ потерь

эта діаграмма весьма существенно уклоняется отъ діаграммы совершенной или идеальной машины.

Для нагляднаго изображенія отклоненій на фиг. 34 дѣйствительная діаграмма вчерчена въ діаграммѣ совершенной машины. Штрихованныя части плоскости изображаютъ потери отъ несовершеннаго расширенія, торможенія, неизбѣжности, обмѣна теплоты и вреднаго пространства.



Фиг. 34. Идеальная и дѣйствительная индикаторная машина.

Отношеніе площади діаграммы дѣйствительной машины къ площади *d e f c d* идеальной машины даетъ термодинамическую степень полезнаго дѣйствія или степень достоинства.

Какъ уже упомянуто въ главѣ 20, идеальная діаграмма машины можетъ быть вычерчена только тогда, когда намъ извѣстенъ расходъ пара. Только тогда можно вычислить вѣсъ G доставляемаго машинѣ свѣжаго пара на одинъ ходъ поршня (фиг. 34). По индикаторной діаграммѣ дѣйствительной машины нельзя опредѣлить вѣсъ пара, такъ какъ при работѣ насыщеннымъ паромъ степень влажности, а при перегрѣтомъ парѣ конечная температура въ концѣ впуска не могутъ быть взяты изъ діаграммы

29. Кривая впуска и выпуска.

Линія впуска въ дѣйствительныхъ машинахъ никогда не имѣетъ вида горизонтальной линіи, а болѣе или менѣе сильно понижается. Причина паденія давленія заключается въ томъ, что паръ на пути отъ котла во внутрь цилиндра претерпѣваетъ потери отъ тренія и торможенія. Наибольшее паденіе происходитъ въ перегрѣвателѣ и трубопроводахъ Если непосредственно передъ цилиндромъ снять діаграмму въ паропроводахъ, то она имѣетъ видъ, указанный на фиг. 35. Паденіе давленія отъ котла до машины здѣсь „y“, въ то время какъ на торможеніе въ парораспредѣленіи и впускныхъ каналахъ приходится только „x“. Такимъ образомъ машина, какъ таковая, обусловливаетъ собой лишь небольшую часть паденія давленія.

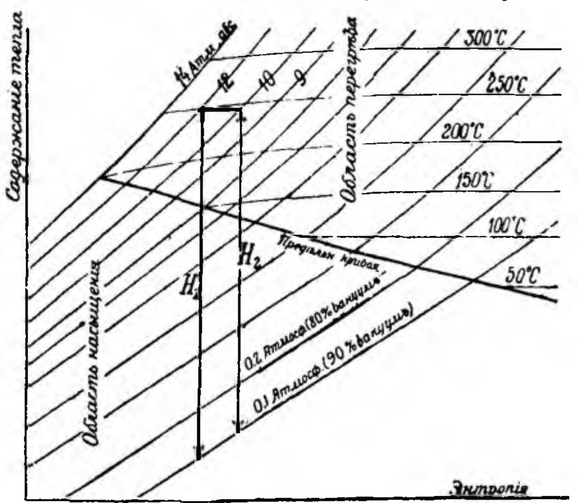


Фиг. 35. Паденіе давленія во время впуска (вверху діаграмма паропровода).

Теоретически совершенно безразлично, обусловливается ли это паденіе давленія преимущественно сопротивленіемъ тренію въ паропроводахъ или торможеніемъ въ парораспредѣлительныхъ органахъ. Паденіе давленія вызываетъ опредѣленную потерю. Однако она не равна площади f (фиг. 36), но меньше ея, такъ какъ треніе пара переходитъ въ теплоту перегрѣва.

Фиг. 36. Потеря отъ расширенія пара во время наполненія.

Что торможеніе дѣйствительно даетъ потерю, вытекаетъ ясно изъ разсужденій, приведенныхъ въ гл. 23. Эта потеря, которая несмотря на постоянное содержаніе теплоты въ парѣ, происходитъ отъ торможенія и равна приращенію энтропіи, умноженному на абсолютную температуру въ конденсаторѣ или выпускаемаго пара.



Фиг. 37. Вліяніе торможенія при впускѣ на адіабатическое паденіе теплоты.

Здѣсь слѣдуетъ однако замѣтить, что торможеніе не бываетъ постояннымъ, а возрастаетъ отъ нуля до нѣкотораго максимума въ концѣ наполненія. Поэтому слѣдуетъ принимать въ расчетъ только половину вышеупомянутой потери.

Эта потеря можетъ быть опредѣлена еще при помощи діаграммы JS фиг. 37. Если бы вообще не происходило

торможенія, то получилось бы паденіе теплоты H_1. Линія впуска въ такомъ случаѣ имѣла бы направленіе отъ d къ e фиг. 36. Если бы происходило такое торможеніе, при которомъ въ теченіе всего періода впуска получалось бы постоянное паденіе давленія, то линія впуска имѣла бы направленіе $d' e'$. Соотвѣтствующее паденіе теплоты H_2 опредѣляется на основаніи того соображенія, что обусловленное тормаженіемъ измѣненіе состоянія выражается въ діаграммѣ JS горизонтальной линіей. На фиг. 37, напр. принято, что паденіе давленія составляетъ 2 атмосф.

Но такъ какъ въ дѣйствительности линія впуска не направляется ни по $d e$, ни по $d' e'$, а по діагонали $e' d$, то соотвѣтствующее линіи впуска $d e'$ адіабатическое паденіе теплоты будетъ лежать между H_1 и H_2. Такъ какъ $d e'$ направляется нѣсколько выше діагонали, то дѣйствительное паденіе теплоты лежитъ ближе къ H_1, чѣмъ къ H_2.

Для полученія адіабатическаго паденія теплоты, соотвѣтствующаго наклонной линіи впуска, можно также исходить изъ средняго давленія p въ діаграммѣ JS.

Опредѣливъ одновременно соотвѣтствующее давленію p адіабатическое паденіе теплоты, находимъ, что разность обоихъ найденныхъ значеній H изображаетъ собой потерю отъ тормаженія въ періодъ впуска.

Въ точкѣ g (фиг. 33), еще ранѣе мертваго положенія поршня, паровыпускной органъ открывается и отъ g до h происходитъ предвареніе выпуска, при чемъ сообразно примѣру II гл. 25 большая часть рабочаго пара уходитъ въ конденсаторъ. Отъ h до i линія выпуска имѣетъ почти прямолинейное направленіе. При этомъ противодавленіе p_2 въ машинѣ больше давленія p' въ конденсаторѣ на величину сопротивленія парораспредѣленія.

Потеря, обусловленная торможеніемъ при выпускѣ пара изъ рабочаго цилиндра, опредѣляется разностью давленія $p_1 - p'$.

30. Кривая расширенія.

При теплонепроницаемыхъ стѣнкахъ цилиндра кривая расширенія должна была бы имѣть видъ адіабаты. Въ дѣйствительности же она всегда идетъ нѣсколько выше адіабаты. Вслѣдствіе неизбѣжнаго обмѣна теплоты (гл. 34) во время расширенія происходитъ обратный токъ теплоты отъ стѣнокъ цилиндра.

Фиг. 38. Построеніе кривой расширенія для насыщеннаго пара.

При насыщенномъ парѣ дѣйствительная кривая расширенія идетъ по закону $p \cdot v =$ Const.[1]). Она представляетъ собой одностороннюю гиперболу, одной осью которой служитъ абсолютная нулевая линія, а другой — линія, проведенная на разстояніи $OB = s'$ вертикально отъ основанія перпендикуляра къ оси абсциссы изъ начальной точки линіи впуска (фиг. 33). При этомъ s представляетъ отнесенное къ ходу поршня вредное пространство т. е.

$$s = \frac{\text{вредное пространство}}{\text{площадь поршня}}$$

[1]) Для газовъ — это уравненіе изотермы или линіи Маріотта. Совпаденіе кривой расширенія для насыщеннаго пара съ изотермой для газовъ — чисто случайное.

Построенiе кривой расширенiя для насыщеннаго пара производится слѣдующимъ образомъ: Черезъ точку 3, въ которой кончается наполненiе, проводятъ вертикальную и горизонтальную прямыя. На послѣдней произвольно выбираютъ точки *a, b, c, d* и *e* и соединяютъ ихъ съ точкой *O*. Черезъ точки пересѣченiя этихъ соединительныхъ линiй съ вертикалью черезъ точку 3 проводятъ горизонтали до пересѣченiя съ вертикалями, проведенными черезъ точки *a, b, c, d* и *e*.

Полученныя точки пересѣченiя соотвѣтственныхъ горизонталей и вертикалей даютъ точки кривой расширенiя. Обыкновенно принимаютъ извѣстное конечное давленiе расширенiя (см. томъ II, главы 6 и 8) и строятъ кривую расширенiя обратнымъ путемъ.

На дѣйствительный видъ кривой расширенiя влiяетъ еще величина наполненiя и то обстоятельство, работаетъ ли машина съ конденсаторомъ или безъ него, а также способъ отопленiя рубашки. При большомъ наполненiи кривая расширенiя часто идетъ ниже гиперболы, а при небольшомъ наполненiи — выше.

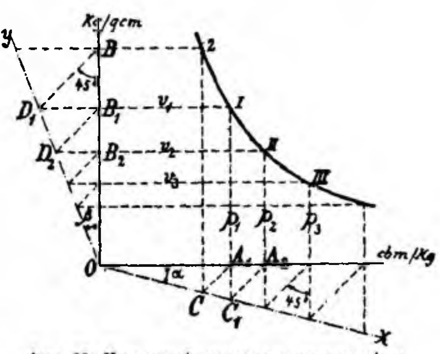
Если бы влажность пара во время расширенiя оставалась неизмѣнной, то кривая расширенiя должна была бы имѣть направленiе по ур—нiя $p \cdot v^{1,067} =$ постоян., т. е. ниже равнобокой гиперболы. Поэтому въ дѣствительности при направленiи расширенiя по закону $p \cdot v =$ постоян. содержанiе пара постоянно увеличивается, а влажность уменьшается. Уменьшенiе влажности объясняется тѣмъ, что паръ во время расширенiя заимствуетъ теплоту отъ стѣнокъ.

При работѣ перегрѣтымъ паромъ дѣйствительная кривая расширенiя, какъ и адiабата, идетъ значительно круче, чѣмъ при насыщенномъ парѣ. При перегрѣтомъ

парѣ она идетъ по закону политропы $p \cdot v^n =$ постоян.[1]); показатель n имѣетъ различное значеніе въ зависимости отъ перегрѣва величины наполненія. Для сильныхъ перегрѣвовъ n достигаетъ значенія 1,2—1,25; съ уменьшеніемъ перегрѣва значеніе n постепенно приближается къ 1.

Отсюда слѣдуетъ, что для различныхъ точекъ кривой расширенія показатель n имѣетъ различныя значенія; наибольшее значеніе n имѣетъ мѣсто въ началѣ расширенія, а наименьшее — въ концѣ его. Обыкновенно при вычерчиваніи кривой расширенія принимаютъ среднее значеніе n.

Для построенія политропическихъ кривыхъ также существуетъ весьма простой графическій способъ, предложенный Брауэромъ. Если на фиг. 39 точка I изображаетъ начальную точку кривой расширенія и необходимо построить точки II и III этой кривой расширенія, то поступаютъ слѣдующимъ образомъ:



Фиг. 39. Построеніе кривыхъ расширенія и сжатія при работѣ перегрѣтымъ паромъ.

Какъ на фиг. 38, точка O представляетъ собой точку пересѣченія абсолютной нулевой линіи съ вертикалью, проведенной на разстояніи s' отъ основанія вертикали черезъ начальную точку линіи впуска. Черезъ точку O подъ угломъ α къ горизонтали проводятъ прямую OX,

[1]) Ср. главу 14.

а подъ угломъ β къ вертикали прямую OY. Уголъ α выбирается совершенно произвольно, а β опредѣляется изъ уравненія $1 + \operatorname{tg}\beta = (1 + \operatorname{tg}\alpha)^n$. Проводя черезъ точку I горизонталь IB_1 и вертикаль IC_1 черезъ точки B_1 и C_1 линіи подъ угломъ въ 45⁰, опредѣляютъ точки D_2 и A_2. Точка пересѣченія проведенныхъ черезъ эти точки горизонтали и соотвѣтственно вертикали даетъ точку II кривой расширенія. Изъ точки II построеніе можетъ продолжаться такимъ же образомъ.

При построеніи кривой сжатія точка 2, а вмѣстѣ съ ней и другія точки опредѣляются такимъ образомъ, что проводятъ вертикаль IA_1 и подъ угломъ въ 45⁰ къ ней линію D_1B. Горизонталь черезъ точку B и вертикаль черезъ точку C пересѣкаются въ искомой точкѣ 2 кривой сжатія.

Уголъ α слѣдуетъ выбирать не слишкомъ большимъ для возможности полученія возможно большаго числа точекъ.

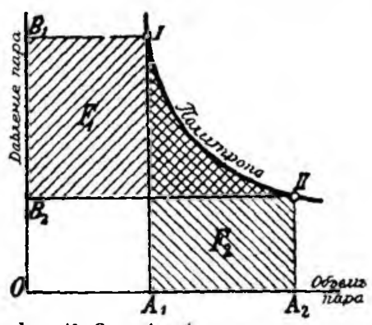
Для построенія кривой расширенія для проектируемой индикаторной діаграммы необходимо сдѣлать нѣкоторое допущеніе относительно величины вреднаго пространства (гл. 33). Если же требуется для снятой индикаторной діаграммы найти значеніе показателя политропы n, то вредное пространство опредѣляется размѣрами цилиндра въ каждомъ данномъ случаѣ.

Кромѣ того должны быть извѣстны масштабъ пружины и стояніе барометра.

Опредѣленіе показателя n между двумя произвольными точками I и II кривой расширенія (фиг. 40) также весьма просто производится графическимъ путемъ. Черезъ точки I и II проводятъ соотвѣтственно вертикаль и горизонталь. Отношеніе заштрихованныхъ площадей непосредственно представляетъ показатель политропы n, т. е.

$$n = \frac{F_1}{F_2} = \frac{III\,B_2B_1}{III\,A_2A_1}.$$

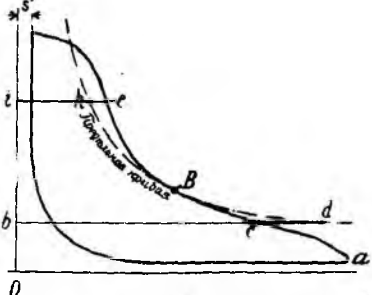
Для опредѣленія состоянія пара въ отдѣльныхъ точкахъ кривой расширенія изслѣдуемой діаграммы и вмѣстѣ съ тѣмъ и состоянія перегрѣтаго пара въ періодъ расширенія, необходимо на нашу діаграмму нанести предѣльную кривую для работающаго вѣсу пара (фиг. 41). Тогда оказывается, что, напр. въ точкѣ *e* паръ еще перегрѣтъ, такъ какъ объемъ сухого насыщеннаго пара составляетъ *i h*, между тѣмъ какъ дѣйствительный объемъ составляетъ *i e*. Чѣмъ больше *h e*, тѣмъ температура пара выше температуры насыщенія.



Фиг. 40. Опредѣленіе показателя *n* для политропы расширенія и сжатія.

По мѣрѣ дальнѣйшаго расширенія кривая постепенно приближается къ предѣльной кривой. Въ точкѣ *B* обѣ кривыя пересѣкаются, т. е. паръ здѣсь бываетъ сухой насыщенный.

Въ точкѣ *c* паръ уже влаженъ и относительное количество пара опредѣляется отношеніемъ *b c* : *b d*, а влажность отношеніемъ *c d* : *b d*.



Фиг. 41. Изслѣдованіе кривой расширенія индикаторной діаграммы.

Подъ точкой B направленіе кривой расширенія бываетъ нѣсколько иное, чѣмъ подъ точкой B.

Нанесеніе предѣльной кривой возможно только тогда, когда найденный путемъ измѣренія расходъ пара извѣстенъ и когда извѣстно количество пара, остающееся во вредномъ пространствѣ послѣ сжатія. Послѣднее обыкновенно не имѣетъ мѣста, и поэтому относительно состоянія пара въ концѣ выпуска необходимо дѣлать извѣстныя допущенія (гл. 36).

Можно себѣ составить ясное понятіе о состояніи пара въ отдѣльныхъ точкахъ кривой расширенія и путемъ вычисленія, опредѣливши относительное количество пара соотвѣтствующихъ точекъ. Если при этомъ получаются $x > 1$, то паръ перегрѣтъ и наоборотъ при x 1 паръ насыщенъ.

Для опредѣленія x необходимо знать удѣльный объемъ пара. Онъ опредѣляется путемъ дѣленія полученныхъ по діаграммѣ объема на вѣсъ рабочаго количества пара и количества свѣжаго пара. Удѣльный же объемъ сухого насыщеннаго пара для различныхъ давленій берется прямо изъ таблицы.

31. Кривая сжатія.

На фиг. 33 кривая сжатія идетъ отъ i до k. Если бы сжатіе производилось до начальнаго давленія, то получались бы, какъ видно изъ энтропійной діаграммы, довольно высокія температуры сжатія. При допущеніи содержанія влажности въ парѣ къ началу сжатія въ 5% при совершенномъ сжатіи отъ 0,1 абсол. атм. до начальнаго давленія въ 13 абс. атм. получилась бы температура въ 600° С.

То обстоятельство, что при сжатіи до начальнаго давленія получаются температуры, далеко превышающія тем-

пературы свѣжаго пара, объясняется тѣмъ, что паръ къ началу сжатія имѣетъ значительно меньшую влажность, чѣмъ въ концѣ расширенія. Вслѣдствіе паденія давленія въ концѣ хода поршня и вслѣдствіе обратнаго тока теплоты отъ стѣнокъ во время выпуска, паръ весьма замѣтно осушается въ теченіе выталкивающаго хода поршня.

Въ началѣ сжатія температура пара бываетъ ниже температуры стѣнокъ, и поэтому паръ сперва заимствуетъ теплоту отъ стѣнокъ. При повышеніи температуры пара выше температуры стѣнокъ въ періодъ дальнѣйшаго сжатія паръ сообщаетъ теплоту стѣнкамъ. Такимъ образомъ процессъ обмѣна теплоты происходитъ здѣсь какъ разъ обратно тому, какъ при рабочемъ ходѣ.

При вычерчиваніи кривой сжатія для проектируемой индикаторной діаграммы исходятъ изъ допущеннаго давленія сжатія p_c. Кривая сжатія слѣдуетъ по закону политропы $p \cdot v^n =$ постоян.; подобно кривой расширенія, она можетъ быть построена по методу Брауэра, при этомъ показатель n обыкновенно принимаютъ 1,2. При машинѣ прямого тока кривая сжатія вслѣдствіе отопленія крышекъ и отсутствія охлаждающаго дѣйствія выпускныхъ каналовъ идетъ приблизительно по адіабатѣ перегрѣтаго пара т. е. здѣсь можно принять $n = 1{,}3$.

Если требуется изслѣдовать кривую сжатія данной діаграммы, то показатель n для отдѣльныхъ частей кривой опредѣляется такъ же, какъ указано въ предыдущей главѣ для кривой расширенія.

32. Польза сжатія.

Мнѣнія различныхъ спеціалистовъ о пользѣ сжатія расходятся между собой. Одни признаютъ, что сжатіе пара не должно итти выше, чѣмъ того безусловно требуетъ спокойный ходъ машины, между тѣмъ какъ другіе

придерживаются того взгляда, что паръ надо сжать по возможности до начальнаго давленія свѣжаго пара. Окончательное рѣшеніе этого спорнаго вопроса возможно лишь путемъ опытовъ.

Если представимъ себѣ машину съ опредѣленнымъ вреднымъ пространствомъ, которая одинъ разъ работаетъ безъ сжатія, другой съ сжатіемъ до начальнаго давленія пара, то нетрудно понять, что въ первомъ случаѣ необходимый для наполненія вреднаго пространства объемъ пара при каждомъ ходѣ поршня не совершаетъ работы въ періодъ наполненія. Потеря работы здѣсь будетъ $V(p \quad p_1)$, гдѣ V объемъ вреднаго пространства, а p и p_1 соотвѣтственно означаютъ давленія пара при впускѣ и выпускѣ.

При работѣ съ полнымъ сжатіемъ хотя отпадаетъ наполненіе вреднаго пространства, однако необходимо совершать нѣкоторую индикаторную работу сжатія. Поэтому для достиженія одинаковой индикаторной работы необходимо работать съ большимъ наполненіемъ. Обусловливаемый этимъ большій расходъ пара почти соотвѣтствуетъ тому, который требуется для наполненія вреднаго пространства при работѣ безъ сжатія. Поэтому путемъ сжатія не достигалось бы замѣтной экономической выгоды. Сюда слѣдуетъ еще присовокупить, что путемъ повышенія сжатія до начальнаго давленія пара получаются весьма высокія температуры сжатія, имѣющія своимъ послѣдствіемъ усиленный обмѣнъ теплоты, такъ какъ передача теплоты отъ пара стѣнкамъ теперь уже начинается въ періодъ сжатія, а при машинахъ безъ сжатія она начинается лишь со впускомъ свѣжаго пара. Поэтому сжатіе должно продолжаться не выше того давленія, которое соотвѣтствуетъ средней температурѣ стѣнокъ[1]). Темпера-

[1]) Это подтверждается послѣдними изслѣдованіями Клемперера.

туры сжатія, далеко превышающія температуру свѣжаго пара, должны неблагопріятно дѣйствовать уже ввиду происходящихъ при этомъ скачковъ температуры.

Если же возразить, что при сильномъ сжатіи пространство сжатія или соотвѣтственно его стѣнки нагрѣваются теплотой сжатія и такимъ образомъ подготовляются для слѣдующаго наполненія, то слѣдуетъ указать, что средствомъ для повышенія температуры стѣнокъ или соотвѣтственно для уменьшенія потери при впускѣ служитъ не сжатіе, а нагрѣваніе. Дѣйствительно, работа сжатія заимствуется отъ маховика и, вслѣдствіе потерь на треніе, требуетъ большей затраты теплоты. Кромѣ того путемъ усиленія сжатія выше опредѣленнаго предѣла понижается механическая степень полезнаго дѣйствія машины. По всѣмъ вышеуказаннымъ причинамъ сжатіе допускаютъ до давленія не выше $^2/_3$ начальнаго давленія.

33. Вредное пространство и его вліяніе.

Пространство, остающееся въ мертвомъ положеніи поршня между нимъ и парораспредѣлительными органами, называется вреднымъ пространствомъ. Большая часть его приходится на паровпускные и паровыпускные каналы, а также на пространства внѣ впускного и внутри выпускного вентилей, остающееся же между поршнемъ и крышкой цилиндра пространство около 3—6 мм. сравнительно мало вліяетъ. Въ среднемъ вредное пространство составляетъ 6—7% объема описываемаго поршнемъ, у нѣкоторыхъ машинъ оно понижается до 2—3%, хотя иногда оно доходитъ до 12%, особенно у быстроходныхъ машинъ. Послѣднее объясняется тѣмъ, что при машинахъ съ короткимъ ходомъ, какъ у быстроходныхъ, объемъ паровыхъ каналовъ почти таковъ же, какъ и у машинъ нор-

мальнаго типа, а также и тѣмъ, что пространство между поршнемъ и крышкой цилиндра не можетъ быть меньше, нежели у послѣднихъ. Поэтому у быстроходныхъ машинъ вредное пространство въ процентномъ отношенiи получается больше.

Если представимъ себѣ двѣ машины, изъ которыхъ одна не имѣетъ вреднаго пространства и сжатiя, а другая работаетъ съ вреднымъ пространствомъ и сжатiемъ до начальнаго давленiя пара, то находимъ, что при совершенномъ расширенiи дiаграммы обѣихъ машинъ получаются почти эквивалентными, такъ какъ необходимая для сжатiя работа получается обратно въ перiодъ расширенiя. Затѣмъ, такъ какъ у машинъ съ вреднымъ пространствомъ находящiйся въ послѣднемъ паръ также принимаетъ участiе въ расширенiи, то поэтому кривая расширенiя здѣсь направляется выше, чѣмъ у машины безъ вреднаго пространства.

Въ дѣйствительности же машина съ вреднымъ пространствомъ работаетъ менѣе выгодно, даже если сжатiе доводятъ до начальнаго давленiя, такъ какъ даже у машинъ съ конденсацiей невозможно использовать расширенiе до противодавленiя. Такимъ образомъ во время расширенiя отъ пара изъ вреднаго пространства получается меньше работы, нежели тратится на сжатiе. Послѣднее объясняется уже тѣмъ, что работа сжатiя берется отъ главнаго вала или соотвѣтственно отъ маховика, между тѣмъ какъ работа расширенiя развивается въ цилиндрѣ.

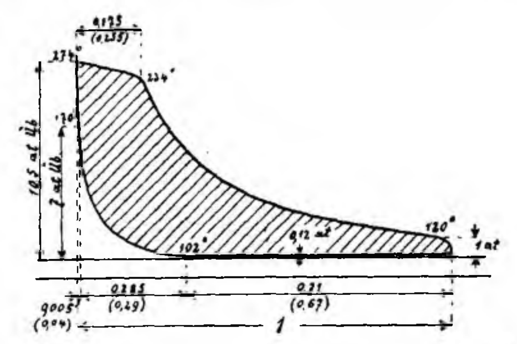
Дальнѣйшiе выводы относятся исключительно къ объему вреднаго пространства. Потери, причиной которыхъ является его поверхность, въ теорiи гораздо больше. Было бы вѣрнѣе говорить о вредной поверхности, нежели о вредномъ пространствѣ. Болѣе подробно объ этомъ въ слѣдующей главѣ.

34. Обмѣнъ теплоты.

Средняя температура стѣнокъ.

Средняя температура стѣнокъ цилиндра бываетъ тѣмъ выше, чѣмъ больше наполненіе и чѣмъ выше температура пара. При работѣ безъ конденсаціи она выше, нежели при работѣ съ конденсаціей. При вычисленіи средней температуры стѣнокъ можно принять, что она равна средней температурѣ пара и можетъ быть найдена слѣдующимъ образомъ:

Фиг. 42 и 43 даютъ діаграммы одноцилиндровой паровой машины съ клапаннымъ парораспредѣленіемъ съ

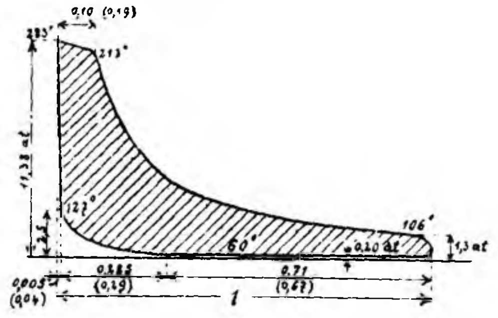


Фиг. 42. Индикаторная діаграмма машины безъ охлажденія.

нормальной мощностью 80 лош. силъ. Одна діаграмма снята при работѣ безъ конденсаціи, а другая при работѣ съ конденсаціей. Мощность машины въ обоихъ случаяхъ составляетъ 110 дѣйствительныхъ лошад. силъ. При работѣ безъ конденсаціи температура впускаемаго пара составляла 274° C, а съ конденсаціей 283° C. Эти температуры относятся только къ началу впуска; въ концѣ же наполненія эти температуры бываютъ значительно ниже, вслѣдствіе

охлаждающаго дѣйствія стѣнокъ цилиндра, средняя температура которыхъ гораздо ниже температуры свѣжаго пара.

Принимая, что при работѣ безъ конденсаціи температура пара въ концѣ наполненія ниже начальной на 40°, а у машины съ конденсаціей на 70°, находимъ написанныя на діаграммѣ температуры пара[1]).



Фиг. 43. Индикаторная діаграмма машины въ 80 лош. сил. съ охлажденіемъ.

На обѣихъ діаграммахъ написаны температуры пара, приблизительно получаемыя въ концѣ расширенія, при выпускѣ и въ концѣ сжатія. Принимая, что паденія температуры между отдѣльными точками происходятъ прямолинейно, находимъ среднюю температуру стѣнокъ цилиндра при работѣ безъ конденсаціи приблизительно изъ уравненія

$$2 \cdot t = \frac{274+234}{2} \cdot 0{,}175 + \frac{234+120}{2} \cdot 0{,}825 + \frac{120+102}{2} \cdot 0{,}71 + \frac{102+170}{2} \cdot 0{,}285 + \frac{170+274}{2} \cdot 0{,}005.$$

Откуда $t = 155^0$ C.

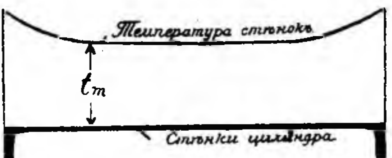
[1]) Эти числа ни въ коемъ случаѣ не взяты слишкомъ высокими. При постоянныхъ машинахъ паденіе температуры въ дѣйствительности больше 40 и соотвѣтственно 70°.

Такимъ же образомъ вычисляется средняя температура стѣнокъ при работѣ съ конденсаціей.

$$2 \cdot t = \frac{283 + 213}{2} \cdot 0{,}10 + \frac{213 + 106}{2} \cdot 0{,}90 + \frac{106 + 60}{2} \cdot 0{,}71 + \frac{60 + 127}{2} \cdot 0{,}285 + \frac{127 + 283}{2} \cdot 0{,}005.$$

Откуда $t = 128^0$ C.

Въ обоихъ этихъ уравненіяхъ вычисленіе производилось просто по путямъ поршня. Въ дѣйствительности же промежутки времени, въ теченіе которыхъ существуютъ среднія температуры, обусловливаются не путями поршня, а путями кривошипа. На фиг. 42 и 43 послѣднія показаны въ скобкахъ. Принимая въ разсчетъ эти числа, находимъ среднія температуры стѣнокъ при работѣ безъ конденсаціи $t = 159{,}6^0$ C, а при работѣ съ конденсаціей $t = 133{,}5^0$ C.



Фиг. 44. Средній ходъ измѣненій температуры вдоль стѣнокъ цилиндра.

Отсюда видно, что конденсація понижаетъ температуру стѣнокъ. Такимъ образомъ, при работѣ съ конденсаціей получается большій обмѣнъ теплоты, нежели при работѣ безъ конденсаціи.

Въ дѣйствительности температура стѣнокъ въ серединѣ цилиндра ниже, чѣмъ у концовъ. Если мы начертимъ діаграмму температуръ пара для обѣихъ сторонъ цилиндра въ теченіе одного оборота кривошипа, принимая во вниманіе продолжительность дѣйствія этой температуры т. е. пути кривошипа, то получимъ діаграмму изображенную на фиг. 44. Эта фигура изображаетъ теорети-

ческій ходъ измѣненій температуры вдоль стѣнокъ цилиндра, если пренебречь съ одной стороны теченіемъ пара, а съ другой движеніемъ теплоты вдоль стѣнокъ.

Взаимодѣйствіе между паромъ и стѣнками цилиндра.

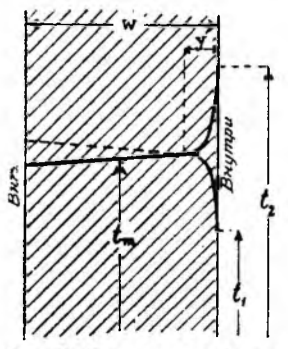
Когда паръ вступаетъ въ цилиндръ, онъ приходитъ въ соприкосновеніе со стѣнками его, которыя были сильно охлаждены предыдущимъ выпускомъ пара. Поэтому во время наполненія и начала расширенія часть теплоты пара передается стѣнкамъ и только въ теченіе остальной части расширенія этотъ переходъ теплоты прекращается. Температура пара теперь падаетъ ниже температуры стѣнокъ цилиндра и тогда начинается обратное теченіе теплоты отъ стѣнокъ къ пару, при чемъ послѣдній нагрѣвается. Это явленіе обнаруживается соотвѣтственно болѣе медленнымъ паденіемъ кривой расширенія.

Главная часть теплоты, идущей обратно отъ стѣнокъ цилиндра къ пару, приходится на періодъ выпуска, при чемъ теплота безполезно уходитъ съ отработавшимъ паромъ.

Вслѣдствіе обмѣна теплоты часть ея, доставленная пару сообщается стѣнкамъ и пробирается вокругъ поршня, не развивая никакой работы. Слѣдствіемъ этого является увеличеніе расхода пара на 25—50% и выше. Чѣмъ больше при прочихъ равныхъ условіяхъ обмѣнъ теплоты, тѣмъ ниже доброкачественность машины (ср. гл. 39).

Самымъ неблагопріятнымъ образомъ обмѣнъ теплоты вліяетъ въ машинахъ съ насыщеннымъ паромъ. Здѣсь во время впуска и начала расширенія часть пара осаждается на стѣнкахъ. Если даже паръ передъ машиной бываетъ сухимъ насыщеннымъ, въ концѣ расширенія онъ содержитъ около 25% и болѣе влажности.

При работѣ перегрѣтымъ паромъ обмѣнъ теплоты имѣетъ своимъ послѣдствіемъ лишь пониженіе температуры пара, а это сопряжено съ гораздо меньшими потерями, чѣмъ при насыщенномъ парѣ. Во всякомъ случаѣ при небольшомъ перегрѣвѣ легко можетъ случиться, что паръ во время впуска переходитъ въ состояніе насыщенія, такъ что расширеніе все равно начинается при влажномъ состояніи пара.



Фиг. 45. Температура стѣнокъ.

Въ обмѣнѣ теплоты участвуетъ не вся толщина стѣнокъ *w*, а только внутренняя ея часть, слой „*y*“ (фиг. 45), такъ какъ отдѣльныя температуры дѣйствуютъ сравнительно только короткіе промежутки времени. Въ теченіе періода выпуска температура внутренняго слоя стѣнокъ постепенно падаетъ до $t^0{}_1$ втеченіе же послѣдующаго періода впуска температура наоборотъ повышается до $t^0{}_2$. Между этими двумя предѣлами колеблется температура внутренняго слоя стѣнокъ втеченіе оборота кривошипа. Съ дальнѣйшей глубиной внутри стѣнокъ колебанія быстро уменьшаются, пока они наконецъ на разстояніи *y* дѣлаются равными нулю. Остальная часть стѣнокъ имѣетъ постоянную температуру. Безъ отопленія температура нѣсколько понижается вслѣдствіе потерь лучеиспусканія наружу. При отопливаемыхъ стѣнкахъ температура идетъ по пунктирной прямой.

Обмѣнъ теплоты между паромъ и стѣнками находится въ зависимости отъ цѣлаго ряда факторовъ. Онъ бываетъ тѣмъ больше, чѣмъ плотнѣе паръ, чѣмъ больше

поверхность соприкосновенія, чѣмъ больше разность температуръ пара и стѣнокъ, чѣмъ дольше періодъ времени. въ теченіе котораго эта разность температуръ дѣйствуетъ, и чѣмъ сильнѣе токъ пара.

Отсюда слѣдуетъ, что путемъ увеличенія числа оборотовъ уменьшается обмѣнъ теплоты, между тѣмъ какъ съ увеличеніемъ разности температуръ онъ возрастаетъ.

Наиболѣе сильному обмѣну теплоты подвергаются тѣ части стѣнокъ, которыя втеченіе всего оборота кривошипа находятся въ соприкосновеніи съ рабочимъ паромъ. Сюда можно отнести главнымъ образомъ паровые каналы и поверхности крышекъ и поршня, такъ какъ эти части съ одной стороны подвергаются дѣйствію наивысшей, а съ другой стороны наинизшей температуры. Въ частности въ каналахъ обмѣнъ теплоты достигаетъ высшаго значенія вслѣдствіе теченія пара, усиливающаго собой передачу теплоты.

Естественно, что этотъ обмѣнъ теплоты зависитъ еще и отъ размѣровъ машины. Поверхности ея возрастаютъ медленнѣе, нежели мощность, т. е. чѣмъ меньше машина, тѣмъ относительно больше ея вредныя поверхности.

Если бы даже возможно было обратно получать всю теплоту, отданную стѣнкамъ во время расширенія, то и тогда обмѣнъ теплоты означалъ бы собой потерю, такъ какъ отдача теплоты происходитъ при высшей температурѣ, а обратное сообщеніе расширяющемуся пару при низшей. Но паденіе температуры, какъ раньше уже было сказано, соотвѣтствуетъ обезцѣниванію теплоты.

Средство для уменьшенія обмѣна теплоты.

Обмѣнъ теплоты можетъ быть уменьшенъ путемъ увеличенія числа оборотовъ, подогрѣванія стѣнокъ (паровая рубашка), распредѣленія паденія температуры на

нѣсколько цилиндровъ (дѣйствiе компаундъ) и путемъ перегрѣва пара. Наиболѣе дѣйствительнымъ средствомъ является послѣднее. Благодаря примѣненiю перегрѣва, подогрѣванiе стѣнокъ и дѣйствiе компаундъ въ значительной степени потеряли свое значенiе. Вмѣсто трехкратнаго расширенiя въ настоящее время при стацiонарныхъ машинахъ примѣняется двухкратное расширенiе (ср. слѣд. главу).

Уменьшенiе обмѣна теплоты путемъ перегрѣва пара объясняется меньшей теплопроводностью и плотностью перегрѣтаго пара. Экономически весьма вредная потеря отъ сгущенiя пара во время впуска при примѣняемыхъ въ настоящее время высокихъ перегрѣвахъ совершенно отсутствуетъ. Часто паръ вступаетъ въ цилиндръ низкаго давленiя даже въ состоянiи нѣкотораго перегрѣва и поэтому часто отказываются отъ примѣненiя паровой рубашки на цилиндрѣ низкаго давленiя.

Другое средство для уменьшенiя потерь отъ обмѣна теплоты состоитъ въ расположенiи выпускныхъ каналовъ внѣ пространства наполненiя, какъ у машинъ прямаго тока.

35. Многократное расширенiе[1]).

Какъ раньше уже было сказано, со времени примѣненiя высокаго перегрѣва многократное расширенiе потеряло свое значенiе. Въ настоящее время для стацiонарныхъ установокъ строятся только машины двойного расширенiя; машины же тройного расширенiя строятся лишь для судовъ. Хотя машины тройного расширенiя въ смыслѣ расхода пара нѣсколько выгоднѣе машинъ двухкратнаго расширенiя, но послѣднiя имѣютъ преимущество меньшей начальной стоимости, особенно при

[1]) Ср. томъ II гл. 9, 63 и 64.

обычномъ въ настоящее время устройствѣ тандэмъ[1]). Если же принять во вниманіе меньшій расходъ масла тандэмъ-машиной, а также упрощеніе обслуживанія вслѣдствіе отпаденія одного цилиндра вмѣстѣ съ приводнымъ его механизмомъ, то незначительное сбереженіе пара въ машинѣ тройного расширенія уравновѣшивается еще тѣмъ болѣе, что слѣдуетъ принять въ расчетъ меньшее помѣщеніе, требуемое машиной-тандэмъ.

Въ пользу машины двойного расширенія говоритъ еще и то обстоятельство, что она допускаетъ большій перегрѣвъ, нежели машина тройного расширенія такъ какъ, въ виду большихъ наполненій, въ цилиндрѣ высокаго давленія получаются очень высокія температуры стѣнокъ.

Машина компаундъ и тандэмъ въ смыслѣ работы не имѣетъ никакихъ преимуществъ передъ одноцилиндровой машиной. Въ послѣдней можно достигнуть той же мощности, при чемъ обыкновенно степень полноты бываетъ даже лучше, чѣмъ у машинъ двухкратнаго расширенія.

Главнѣйшее преимущество двухкратнаго расширенія заключается въ томъ, что путемъ распредѣленія паденія температуры на два цилиндра уменьшается обмѣнъ теплоты. Другимъ преимуществомъ ея предъ одноцилиндровой машиной является то, что давленія приводного механизма и потери отъ неплотности поршня въ ней бываютъ меньше. Въ одноцилиндровой машинѣ полное давленіе пара дѣйствуетъ на одинъ поршень, діаметръ котораго соотвѣтствуетъ діаметру цилиндра низкаго давленія. Поэтому въ началѣ хода получается большой избытокъ давленія на поршень, чѣмъ обусловливается необходимость болѣе тяжелаго приводного механизма, нежели у тандэмъ-машины. Въ машинахъ двойного расширенія

[1]) Ср. томъ II гл. 9.

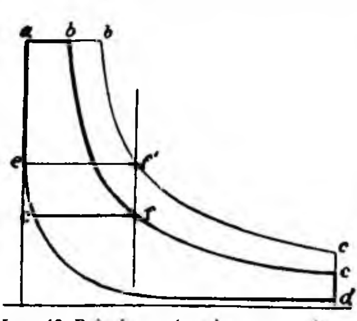
неплотности поршня цилиндра высокаго давленiя и органовъ парораспредѣленiя использовываются въ цилиндрѣ низкаго давленiя.

Какъ преимущество компаундъ-машины принимается еще въ расчетъ то обстоятельство, что силу расширенiя пара можно использовать лучше, нежели въ одноцилиндровой машинѣ. Въ послѣдней экономически наивыгоднѣйшее давленiе въ концѣ расширенiя уже въ виду передачи теплоты лежитъ выше, чѣмъ въ машинѣ-тандэмъ. Вслѣдствiе этого въ одноцилиндровой машинѣ получаются болѣе значительныя потери отъ несовершеннаго расширенiя.

Кромѣ того слѣдуетъ принять во вниманiе, что въ настоящее время, при примѣняемыхъ высокихъ давленiяхъ пара, получаются для одноцилиндровой машины небольшiя наполненiя. Поэтому открыванiе и закрыванiе паровпускныхъ органовъ должно происходить въ болѣе короткое время, нежели въ цилиндрѣ машины тандэмъ. Но при обычныхъ въ настоящее время большихъ числахъ оборотовъ, получается скорое изнашиванiе парораспредѣлительныхъ органовъ, особенно при клапанныхъ парораспредѣленiяхъ. Кромѣ того вообще регулированiе при такихъ небольшихъ наполненiяхъ не можетъ быть точно, такъ какъ незначительное уже измѣненiе наполненiя вызываетъ большiя колебанiя въ работѣ. Это обстоятельство въ связи съ большими давленiями передаточнаго механизма въ практикѣ служатъ причиной тому, что въ одноцилиндровыхъ машинахъ расширенiя не производятъ до того предѣла, какъ въ машинахъ компаундъ. Поэтому дiаметръ цилиндра одноцилиндровой машины дѣлается меньше дiаметра цилиндра низкаго давленiя машины- компаундъ.

Недостатками машины-компаундъ являются, съ одной стороны, — менѣе точное регулированiе, а съ другой, то

обстоятельство, что измѣненіе мощности не можетъ колебаться въ такихъ предѣлахъ, какъ въ одноцилиндровой машинѣ. Если, напр., въ цилиндрѣ высокаго давленія большое наполненіе, то его мощность измѣнится весьма немного, наоборотъ давленіе въ ресиверѣ возрастаетъ, вмѣстѣ съ нимъ возрастаетъ работа пара въ цилиндрѣ низкаго давленія, т. е. является неравномѣрное распредѣленіе работы въ обоихъ цилиндрахъ, какъ видно изъ діаграммы фиг. 46. Это обстоятельство въ свою очередь имѣетъ своимъ послѣдствіемъ одностороннее увеличеніе паденія температуры и давленій поршня. Послѣднее обстоятельство въ названныхъ машинахъ обусловливаетъ собой одностороннюю нагрузку приводного механизма.



Фиг. 46. Вліяніе измѣненія наполненія на теоретическую индикаторную діаграмму машины двойного расширенія.

Болѣе медленное регулированіе машины двойного расширенія объясняется присутствіемъ ресивера. При уменьшеніи наполненія цилиндра высокаго давленія, находящійся въ ресиверѣ паръ работаетъ до тѣхъ поръ, пока не устанавливается соотвѣтствующее новому состоянію равновѣсія меньшее давленіе ресивера. При увеличеніи же наполненія цилиндра высокаго давленія часть вступившаго пара задерживается въ ресиверѣ до тѣхъ поръ, пока въ немъ не установится большее давленіе, соотвѣтствующее новой мощности машины. Такимъ образомъ въ обоихъ случаяхъ объемъ ресивера неблагопріятно дѣйствуетъ на регулировку.

Поэтому ресиверъ дѣлаютъ по возможности небольшимъ и обыкновенно довольствуются обыкновенной перепускной трубой.

Дѣйствіе компаундъ обусловливаетъ собой повышеніе потери отъ лучеиспусканія, такъ какъ излучающія поверхности, къ которымъ принадлежитъ также и поверхность ресивера, больше, нежели въ одноцилиндровой машинѣ. Кромѣ того потери отъ торможенія также больше, нежели въ одноцилиндровой машинѣ, такъ какъ при переходѣ изъ цилиндра высокаго давленія въ цилиндръ низкаго давленія паръ долженъ переходить черезъ два клапана и ресиверъ.

Насколько принципъ прямоточности кажется предназначеннымъ для замѣны компаундъ-машины приведено въ т. II гл. 64.

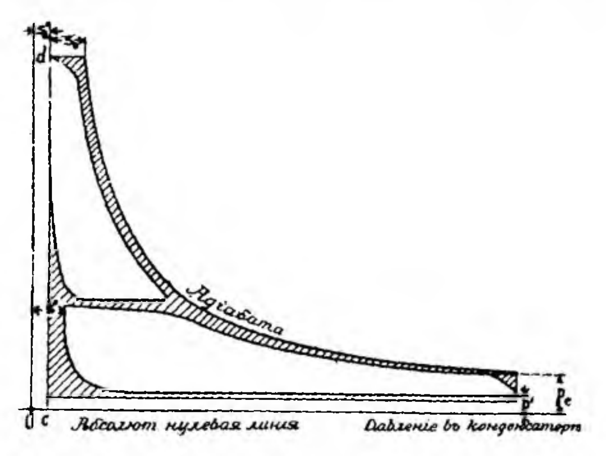
Ранкинизированіе діаграммъ[1]).

Для полученія приблизительнаго понятія о порядкѣ въ машинахъ двойного расширенія и для возможности сравненія между собой діаграммъ машинъ, работающихъ при одинаковыхъ условіяхъ, ранкинизируютъ діаграммы (фиг. 47). Для этой цѣли вычерчиваютъ діаграммы цилиндровъ высокаго и низкаго давленія въ одномъ и томъ же масштабѣ силъ одну надъ другой такъ, что длина діаграммы цилиндра высокаго давленія, помноженной на отношеніе объемовъ цилиндровъ, равнялась бы длинѣ діаграммы цилиндра низкаго давленія. При этомъ обыкновенно поступаютъ такимъ образомъ, что выбираютъ общую нулевую точку O, отъ которой обѣ діаграммы отстоятъ на величину вредныхъ пространствъ s' и s''. Если теперь на ранкинизированныя діаграммы наложить теоретическую діаграмму соотвѣтственной одноцилиндровой машины, то

[1]) Ранкинизированіе діаграммы имѣетъ значеніе перечерчиванія.

заштрихованныя площадки дадутъ намъ представленіе о потеряхъ работы вслѣдствіе обмѣна теплоты, вреднаго пространства, торможенія и неплотностей. Отношеніе площадей ранкинизированной діаграммы къ теоретической называется степенью наполненія.

Существуютъ различные способы нанесенія теоретической діаграммы. Большею частью довольствуются тѣмъ,



Фиг. 47. Ранкинизированная индикаторная діаграмма машины двойного расширенія (обозначеніе p' слѣдуетъ замѣнить p_l).

что черезъ точку конца наполненія строятъ равностороннюю гиперболу. При этомъ получаются различныя значенія степени полноты. Поэтому слѣдуетъ всегда указать, какимъ путемъ опредѣлена данная степень наполненія.

На фиг. 47 s_0 обозначаетъ найденный измѣреніемъ дѣйствительно впущенный объемъ пара. Адіабата должна быть построена изъ точки c. Для опредѣленія направленія дѣйствительной кривой расширенія служитъ точка O.

Степень наполненія, отнесенная къ гиперболѣ изъ конечной точки наполненія, колеблется въ зависимости отъ совершенства работы разсматриваемой компаундъ-машины между 65 и 75⁰/₀.

Для машины тройного расширенія при прочихъ равныхъ условіяхъ степень наполненія была бы меньше, а для одноцилиндровой машины, наоборотъ, больше.

Впрочемъ для одноцилиндровыхъ машинъ степень наполненія обыкновенно не дается.

Нужно замѣтить, что степень наполненія изображаетъ собой лишь величину для сравненія, но не идентична съ термодинамической степенью полезнаго дѣйствія. Полная согласованность съ послѣдней получилась бы лишь тогда, когда степень наполненія была бы отнесена къ идеальной діаграммѣ (машины съ совершеннымъ расширеніемъ по Клаузіусъ-Ранкину)

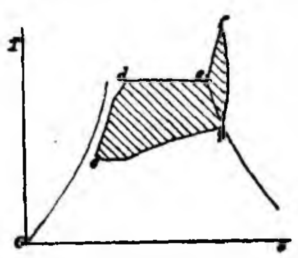
36. Тепловая діаграмма дѣйствительной машины.

Фиг. 48, 52 и 56 изображаютъ тепловыя діаграммы дѣйствительныхъ машинъ. Въ виду потерь отъ вреднаго пространства, обмѣна теплоты, несовершеннаго расширенія, торможенія и небрежности онѣ замѣтно уклоняются отъ теоретической діаграммы.

Для построенія тепловой діаграммы какой-нибудь машины прежде всего необходима индикаторная діаграмма, а затѣмъ и расходъ пара; кромѣ того, должно быть извѣстно вредное пространство и количество остающагося въ немъ пара (количество пара при сжатіи). Но въ виду неизвѣстности состоянія пара въ моментъ начала сжатія, относительно послѣдняго необходимо сдѣлать допущенія.

Для возможности вычерчиванія тепловой діаграммы дѣлаютъ допущеніе, что только часть пара, видимая въ каждомъ данномъ случаѣ на индикаторной діаграммѣ находится въ парообразномъ состояніи, остальная же часть находится въ жидкомъ. При этомъ для простоты представляютъ себѣ, что жидкость находится въ самомъ цилиндрѣ и имѣетъ ту же температуру и давленіе, что и паръ. Такимъ образомъ рабочій цилиндръ служитъ одновременно и котломъ и конденсаторомъ.

Только при этомъ предположеніи возможно перенесеніе точекъ діаграммы давленій на тепловую діаграмму. Такимъ образомъ тепловая діаграмма изображаетъ не дѣйствительно происходящій въ цилиндрѣ рабочій процессъ, а лишь воображаемый, при которомъ все рабочее количество пара съ начала до конца находится въ цилиндрѣ. Это допущеніе имѣетъ мѣсто лишь для періода расширенія[1]), между тѣмъ какъ въ періодъ впуска и выпуска количество пара въ цилиндрѣ мѣнястся по величинѣ въ каждый данный моментъ и неизвѣстно. Такъ какъ однако въ тепловой діаграммѣ, вычерченной при прежнихъ допущеніяхъ, конечныя состоянія пара совпадаютъ съ дѣйствительными состояніями работающаго количества пара и такъ какъ воображаемый процессъ, если бы онъ дѣйствительно былъ выполненъ въ машинѣ, далъ



Фиг. 48. Дѣйствительная тепловая діаграмма машины съ перегрѣтымъ паромъ безъ конденсаціи.

[1]) Во всякомъ случаѣ здѣсь слѣдуетъ указать, что опредѣленіе оставшагося пара основано на произвольномъ допущеніи (ср. выноски стр. 111).

бы одинаковую индикаторную діаграмму и вмѣстѣ съ тѣмъ одинаковую внѣшнюю работу, какъ и дѣйствительный процессъ, то на основаніи перваго закона термодинамики сообщенное и заимствованное количество теплоты (для каждаго періода) были бы одинаковы, какъ и при дѣйствительномъ процессѣ. Поэтому при вычисленіи степени полезнаго дѣйствія можно воображаемый и дѣйствительный процессы принять равными между собою. Другими словами: площади теплоты, измѣренныя для всего періода, вѣрны, но о дѣйствительномъ состояніи находящагося въ цилиндрѣ пара (содержаніе въ немъ воды) въ теченіе періодовъ впуска и выпуска, тепловая діаграмма даетъ такъ же мало свѣдѣній, какъ и индикаторная.

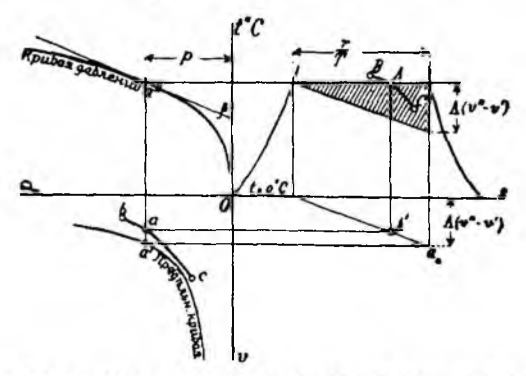
Различныя точки тепловой діаграммы опредѣляются или расчетнымъ или графическимъ путемъ. Обыкновенно расчетный путь болѣе удобенъ и болѣе точенъ. При этомъ поступаютъ слѣдующимъ образомъ: опредѣляютъ вѣсъ остающагося въ цилиндрѣ пара G_2, при чемъ принимаютъ, что паръ въ началѣ сжатія бываетъ сухой, насыщенный[1]).

Если $G_2 \sim$ вѣсъ свѣжаго пара, доставляемаго за одинъ ходъ поршня, тогда $G_2 + G_f$ изображаетъ рабочій вѣсъ пара. На разстояніи s', равномъ вредному пространству, проводятъ вертикальную прямую (фиг. 41) и на индикаторную діаграмму наносятъ предѣльную кривую для рабочаго вѣса пара $G_2 + G_f$. Для нанесенія, напр., точки „c" кривой расширенія на тепловую діаграмму, опредѣляютъ давленіе въ точкѣ c и изъ таблицы для пара выбираютъ соотвѣтствующую температуру. Тогда можно нанести изотерму (горизонталь) на тепловую діаграмму, на которой лежитъ искомая точка. Послѣдняя опредѣля-

---

[1]) Допущеніе сухого насыщеннаго состоянія пара въ началѣ сжатія произвольно; болѣе вѣроятно, особенно у машинъ съ конденсаціей, $x < 1$.

ется путемъ раздѣленія разстоянія между предѣльными кривыми въ отношеніи $bc : bd$. Точно такимъ же способомъ переносятъ на тепловую діаграмму точки кривой выпуска, сжатія и впуска, поскольку онѣ лежатъ въ области насыщенія. Для тѣхъ точекъ которыя лежатъ внѣ предѣльной кривой, т. е. въ области перегрѣва, температура опредѣляется на основаніи уравненія состоянія пара. Если, напр., требуется перенести на тепловую діаграмму точку „e“ (фиг. 41), то сперва опредѣляютъ



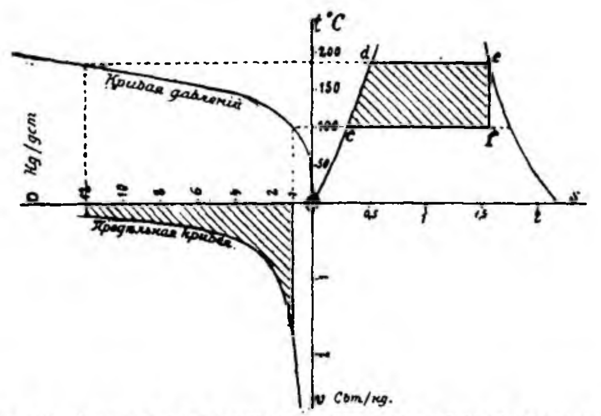
Фиг. 49. Графическое построеніе зависимости между кривыми pv и TS.

удѣльный объемъ пара v, опредѣляя соотвѣтствующій отрѣзку ie объемъ цилиндра и дѣля его на $G_2 + G_f$. Помощью величинъ p и v изъ уравненія

$$v = 0{,}001 + 47\frac{T}{P} - \mathfrak{V}$$

опредѣляется температура T. Если имѣется таблица энтропій, на которой нанесены кривыя v, то T прямо опредѣляется на пересѣченіи кривыхъ p и v. Такимъ же путемъ опредѣляются также и всѣ остальныя точки, на-

ходящіяся въ области перегрѣва. Основная мысль графическаго способа Бульвена[1]) заключается въ томъ, чтобы найти такую зависимость между тепловой и pv діаграммами, при которой соотвѣтственныя точки одной діаграммы прямо переносились бы на другую. Для этой цѣли въ прямоугольной координатной системѣ (фиг. 49) въ верхнемъ правомъ квадрантѣ чертятся предѣльныя кривыя



Фиг. 50. Діаграммы pv и тепловая машины безъ потерь съ совершеннымъ расширеніемъ. (Процессъ Клаузіусъ-Ранкина.)

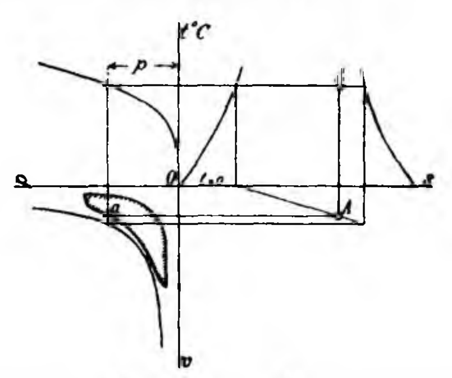
тепловой діаграммы для насыщеннаго пара такимъ образомъ, что горизонтальная ось соотвѣтствуетъ температурамъ въ °C; въ верхнемъ лѣвомъ квадрантѣ чертятъ въ произвольномъ масштабѣ кривую давленій насыщеннаго водяного пара, сохраняя для температуры масштабъ температуры тепловой діаграммы. Зависимость между нане-

[1]) Этотъ способъ подробно описанъ Шретеромъ и Кобомъ въ Z. d. V. d. I. 1903 стр. 1409.

сенной на лѣвомъ квадрантѣ кривой насыщенія опредѣляется изъ уравненія Клапейрона-Клаузіуса.

$$A\,(v'' - v') = \frac{\frac{r}{T}}{\operatorname{tg}\beta}.$$

Точкѣ A тепловой діаграммы съ удѣльнымъ количествомъ пара x соотвѣтствуетъ точка a на діаграммѣ pv. Такимъ образомъ всякая кривая давленій на діаграммѣ $pv.$, напр., кривая расширенія „bac" индикаторной



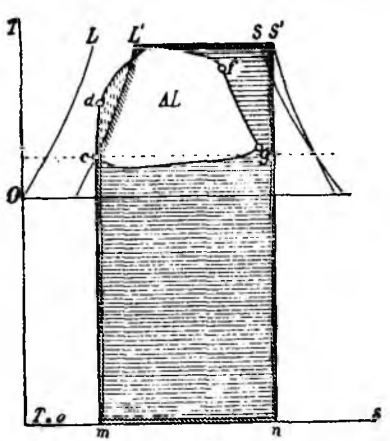
Фиг. 51. Перенесеніе индикаторной діаграммы на тепловую. (Способъ Бульвина.)

діаграммы, можетъ быть перенесена на тепловую діаграмму. Фиг. 50 даетъ зависимость между идеальной паровой діаграммой (процессъ Клаузіусъ-Ранкина) и соотвѣтственной тепловой діаграммой.

Слѣдуетъ замѣтить, что значенія $A\,(v'' - v')$ не должны быть нанесены именно въ томъ масштабѣ, въ какомъ они получаются непосредственно изъ тепловой діаграммы помощью касательныхъ къ кривой давленій. Для кривой

насыщенія можетъ быть выбранъ любой масштабъ. Проще всего она вычерчивается помощью таблицъ для пара.

Перенесеніе произвольной индикаторной діаграммы на тепловую видно изъ фиг. 51. Точка *A* дѣлитъ разстояніе между предѣльными кривыми въ томъ же отношеніи въ какомъ точка „*a*" дѣлитъ разстояніе между горизонтальной осью и кривой насыщенія.



Фиг. 52. Тепловая діаграмма одноцилиндровой машины для насыщеннаго пара (предѣльныя кривыя L и S относятся къ общему количеству пара $G_f + G_r$, между тѣмъ, какъ L' и S' относятся лишь къ G_f).

Въ изображенной на фиг. 52 тепловой діаграммѣ для машины, работающей насыщеннымъ паромъ, *cd* соотвѣтствуетъ сжатію, *df* — впуску пара, *fg* — расширенію и *gc* выпуску. Здѣсь ясно видно, что вслѣдствіе обмѣна теплоты, расширеніе не происходитъ адіабатически. Заимствуемая стѣнками цилиндра во время сжатія и впуска теплота въ періодъ расширенія отчасти сообщается обратно работающему пару. Поэтому расширеніе пара происходитъ при усиленномъ притокѣ теплоты. На фиг. 52 окаймленная площадь означаетъ сообщенную свѣжему пару вѣсомъ G_f теплоту, причемъ предположено отсутствіе паровой рубашки. Площадь *cdfge* тепловой діаграммы изображаетъ теплоту, превращенную въ индикаторную работу. Такимъ обра-

зомъ отношеніе обѣихъ площадей соотвѣтствуетъ термической степени полезнаго дѣйствія рабочаго процесса. Потерянная теплота выражена площадью, горизонтально заштрихованной безъ вертикально заштрихованной.

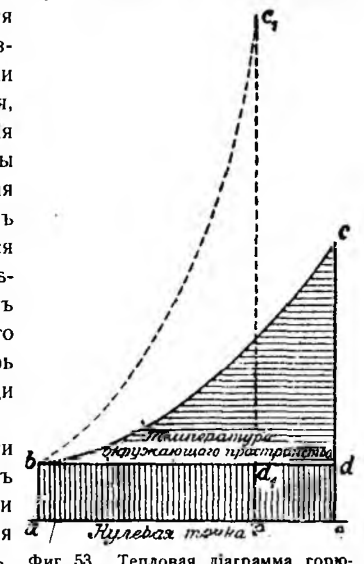
Вышеразобранный графическій способъ служитъ лишь для области насыщенія между предѣльными кривыми. Если работа происходитъ съ перегрѣтымъ паромъ, то при достаточно высокой начальной температурѣ часть линій впуска и расширенія лежитъ внѣ предѣльныхъ кривыхъ. Для перенесенія этой части индикаторной діаграммы, лежащей въ области перегрѣва, на тепловую діаграмму, Бульвенъ также предложилъ графическій способъ, при которомъ теплоемкость перегрѣтаго пара принята постоянной. Но такъ какъ въ дѣйствительности c_p измѣняется съ измѣненіемъ давленія и температуры, то лучше, отказавшись отъ графическаго метода, опредѣлить расположенныя въ области перегрѣва точки путемъ вычисленія вышеуказаннымъ способомъ.

VI. Использованіе теплоты въ дѣйствительной машинѣ.

37. Причины потерь.

Для полученія ясной картины о потеряхъ въ паровой силовой установкѣ, лучше всего исходить отъ происходящаго въ топкѣ котла процесса сжиганія топлива. Послѣдній изображенъ помощью тепловой діаграммы фиг. 53. Продукты горѣнія нагрѣваются по кривой $b\,c$ отъ температуры окружающей среды до температуры горѣнія, заимствуя при этомъ изображенную заштрихованной площадью теплоту. Изъ этого количества теплоты для раз-

витія работы можетъ быть использовано не больше того количества, которое изображено горизонтально заштрихованной площадью, такъ какъ заимствованіе или отводъ теплоты ни въ коемъ случаѣ невозможны при температурѣ ниже температуры окружающей среды. Если представить себѣ идеальный случай топки, т. е. допустить, что въ топку впускается какъ разъ столько воздуху, сколько теоретически требуется для горѣнія, то температура горѣнія значительно поднялась бы и получилась бы тепловая діаграмма $a\,b\,c_1\,e_1$. Въ этомъ случаѣ получается болѣе выгодное распредѣленіе работы, такъ какъ остающаяся отъ рабочаго процесса теплота теперь равна только площади $a\,b\,d_1\,e_1$.



Фиг. 53. Тепловая діаграмма горючихъ газовъ топки котла.

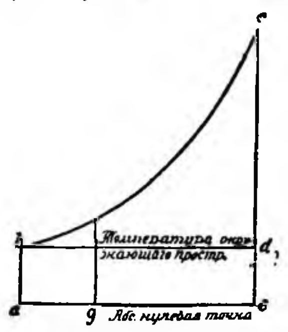
Въ дѣйствительности приходится вести расчетъ съ болѣе значительными потерями. Главная потеря обусловливается тѣмъ, что при передачѣ теплоты отъ горючихъ газовъ пару происходитъ весьма сильное паденіе температуры, т. е. обезцѣниваніе теплоты. Это обнаруживается вполнѣ ясно при опредѣленіи термической степени полезнаго дѣйствія идеальной машины, работающей насыщеннымъ паромъ по процессу Карно съ полнымъ расширеніемъ. Если примемъ давленіе свѣжаго пара въ

12 маном. атм., соотвѣтствующее температурѣ 190,6° С, при температурѣ въ конденсаторѣ въ 40° С найдемъ

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{150,6}{463,6} = 0,325,$$

т. е. потери составляютъ 67,5%. Въ это число еще не входятъ потери въ котельной установкѣ.

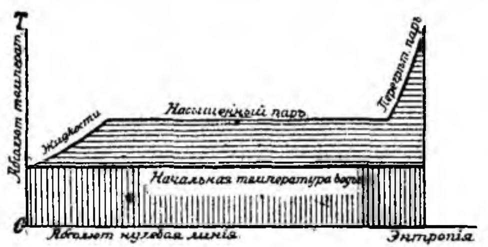
Послѣ этого общаго вступленія разсмотримъ каждую потерю въ отдѣльности. При образованіи пара часть теплоты топлива теряется путемъ теплопроводимости и лучеиспусканія, вслѣдствіе неполнаго сгоранія и съ уходящими отработавшими газами. Послѣдняя потеря на фиг. 54 изображена площадью $abfg$. Всѣ потери въ котельной установкѣ въ среднемъ составляютъ 25%, остальныя 75% теплоты топлива передаются содержимому котла, т. е. опять являются въ видѣ теплоты пара. Здѣсь однако, какъ было замѣчено выше, происходитъ обезцѣненіе теплоты, такъ какъ при абсолютной температурѣ горѣнія въ 1500° С. и температурѣ уходящихъ газовъ въ 500° С. теплота безъ развитія работы падаетъ отъ 1500—500° до абсолютной температуры питательной воды или соотвѣтственно пара. Сообщенные пару 75% теплоты топлива теперь распредѣляются, какъ показано на фиг. 55, гдѣ располагаемая для превращенія въ работу часть теплоты изображается горизонтально заштрихованной площадью.



Фиг. 54. Тепловая діаграмма горячихъ газовъ (потеря отъ уходящихъ отработавшихъ газовъ).

Эта работа можетъ быть использована въ совершенной машинѣ, работающей по процессу Клаузіусъ-Ранкина.

Въ дѣйствительности же и здѣсь опредѣленная часть теплоты теряется, какъ показано на фиг. 56, изображаю-

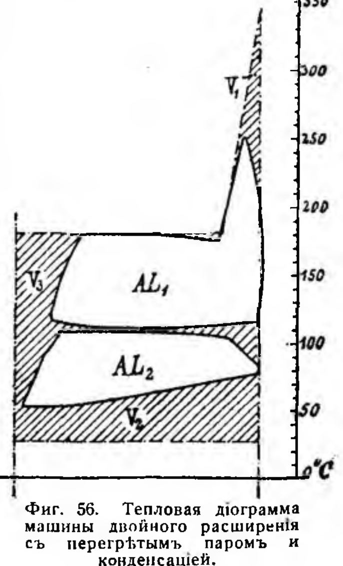


Фиг. 55. Энтропійная діаграмма температуръ водяного пара, теоретическая наибольшая работа.

щей тепловую діаграмму тандэмъ-машины, работающей перегрѣтымъ паромъ. Заштрихованныя площади изображаютъ площади потерь.

Потери происходятъ:

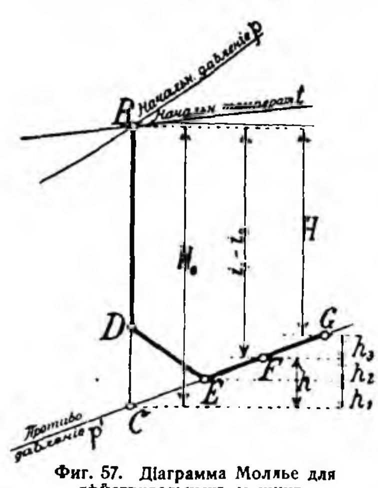
1. Отъ обмѣна теплоты между паромъ и стѣнками цилиндра (площадь V_1).
2. Отъ несовершеннаго расширенія рабочаго пара и отведенія теплоты въ конденсаторъ, происходящаго при температурѣ 40—50° C. На фиг. 56 эта потеря изображена площадью V_2,



Фиг. 56. Тепловая діограмма машины двойного расширенія съ перегрѣтымъ паромъ и конденсаціей.

3. Отъ лучеиспусканія, неплотности и торможенія. Послѣдствіемъ всѣхъ этихъ потерь является то, что индикаторная работа въ самомъ лучшемъ случаѣ составляетъ только 18—19% теплоты топлива.

Изображая на діаграммѣ JS потери въ дѣйствительной машинѣ сравнительно съ потерями въ совершенной, получаемъ діаграмму, показанную на фиг. 57. Въ совершенной машинѣ получилась бы работа, изображаемая адіабатическимъ паденіемъ теплоты H_0. Въ дѣйствительности же въ индикаторную работу превращается только паденіе теплоты H, такъ какъ необходимо замѣтить, что расширеніе происходитъ не совершенное, а прекращается въ точкѣ D.



Фиг. 57. Діаграмма Молье для дѣйствительныхъ машинъ.

Поэтому на діаграммѣ JS приходятъ не въ точку C, а въ точку E. Значеніе h, изображаетъ собою потерю отъ несовершеннаго расширенія, т. е. теоретическую потерю отъ отработавшаго пара.

Вслѣдствіе потери отъ обмѣна теплоты, торможенія и небрежности (неплотностей) дѣйствительное состояніе отработавшаго пара соотвѣтствуетъ не точкѣ E, а напр., точкѣ F, и дѣйствительная потеря h отъ отработавшаго пара больше h на величину h_2.

Если содержаніе теплоты въ свѣжемъ парѣ (точка B) равно i_1, а въ отработавшемъ (точка F) i_2, то на каждый килогр. пару исчезло $(i_1 - i_2)$ калорій. Въ индикаторную же работу превратилась только часть, соотвѣтствующая паденію H теплоты. Разность h_3 приходится на потери отъ лучеиспусканія.

Вся потеря составляетъ

$$H_0 - H = h_1 + h_2 + h_3.$$

38. Способы уменьшенія потерь теплоты.

Для уменьшенія перечисленныхъ въ предыдущей главѣ потерь существуютъ различные способы. Потеря V_1 отъ обмѣна теплоты весьма замѣтно уменьшается путемъ примѣненія высшихъ температуръ пара и уменьшенія по возможности вредныхъ пространствъ. Потеря V_2 уменьшается при помощи двигателей и турбинъ для отработавшаго пара[1]). Первыя, называемыя также холодными паровыми машинами, послѣ изобрѣтенія паровыхъ турбинъ низкаго давленія совершенно исчезли съ горизонта. (Ср. въ этомъ отношеніи нижесказанное о двигателяхъ, работающихъ смѣсью газовъ).

Что касается главной потери въ процессѣ паровой машины, паденія температуры и связаннаго съ нимъ увеличенія энтропіи, то она нѣсколько уменьшается путемъ перегрѣва пара. Однако сообщаемая при высокой температурѣ теплота перегрѣва составляетъ только небольшую часть всей теплоты, вслѣдствіе чего въ гл. 24 и было указано, что главное преимущество перегрѣва слѣдуетъ усматривать въ уменьшеніи обмѣна теплоты. Поэтому было бы экономически невыгодно повышать

[1]) Болѣе подробно о турбинахъ съ отработавшимъ паромъ въ гл. 45.

температуру пара до высшаго предѣла, при которомъ отработавшій паръ оставляетъ машину какъ разъ въ сухомъ насыщенномъ состояніи. Въ дѣйствительности необходимо работать при еще болѣе низкой температурѣ въ виду большей надежности работы.

Если паденіе температуръ отъ температуры горючихъ газовъ до температуры пара не можетъ быть дальше уменьшено, такъ какъ на практикѣ невозможно превысить опредѣленныя давленія и температуры пара, то слѣдовало бы стремиться къ устраненію потери, обусловленной медленнымъ нагрѣваніемъ питательной воды. Но эта потеря, которая на фиг. 56 изображена площадью V_3, всегда должна оставаться. Она могла бы быть устранена только путемъ адіабатическаго сжатія смѣси пара и воды по процессу Карно до давленія въ котлѣ. Послѣднее было бы выполнимо въ машинѣ лишь тогда, если бы рабочій цилиндръ служилъ одновременно и конденсаторомъ и котломъ и если бы вредное пространство въ немъ равнялось бы нулю, что по очевиднымъ причинамъ практически невыполнимо. Поэтому для адіабатическаго сжатія смѣси воды и пара необходимо было бы устроить особый компрессоръ. Но такого рода механическій нагрѣватель питательной воды помимо конструктивныхъ затрудненій и высокой его стоимости, вслѣдствіе его собственныхъ сопротивленій, израсходовалъ бы весь выигрышъ и поэтому указанный методъ также оказывается непримѣнимымъ.

Такимъ образомъ для уменьшенія потерь, обусловливаемыхъ паденіемъ температуры до температуры воды не остается другого средства, кромѣ по возможности высокаго подогрѣва воды до поступленія ея въ котелъ помощью отработавшаго пара или уходящихъ газовъ.

Такъ какъ обыкновенная машина, работающая водянымъ паромъ, въ состояніи использовать лишь относительно незначительное паденіе температуры, то для улучшенія рабочаго процесса стали имѣть въ виду нѣкоторыя другія рабочія вещества. Такъ, напр., Шреберъ предложилъ такую машину, въ которой употребляются три жидкости, которыя при практически примѣнимыхъ давленіяхъ могутъ использовать располагаемую область температуръ въ послѣдовательныхъ ступеняхъ. Для температуръ 310—190° С. Шреберъ предлагаетъ анилинъ, для 190—80° С. водяной паръ, а для 80—30° этиламинъ. По его мнѣнію такого рода трехжидкостная машина въ состояніи была бы преобразовать въ работу 33,4% теплоты горючихъ газовъ, если бы температура горючихъ газовъ могла бы быть использована до 180° С. Но до сихъ поръ опыты надъ многожидкостными машинами разбиваются о практическія затрудненія, такъ какъ всѣ эти вещества въ сравненіи съ водою обладаютъ нежелательными качествами, какъ напр. высокой цѣной, ядовитостью, легкой воспламеняемостью, химическимъ непостоянствомъ и т. д. По этой же причинѣ не могла привиться на практикѣ предложенная Берендомъ и Цимерманомъ и усовершенствованная проф. Іоссе холодная паровая машина.

Наилучшее использованіе теплоты топлива получается въ такихъ установкахъ, гдѣ теплота, кромѣ цѣлей двигательныхъ, требуется еще для цѣлей варки и отопленія (гл. 42—44).

39. Термодинамическая и термическая степень полезнаго дѣйствія.

Для сравненія между собою двухъ машинъ опредѣляютъ ихъ термодинамическую степень полезнаго дѣйствія

или степень доброкачественности, которая даетъ намъ безупречное представленіе объ экономіи пара. Цифры расхода пара для разныхъ машинъ на основаніи вышесказаннаго, не могутъ быть сравниваемы между собою, такъ какъ давленія и температуры пара большею частью бываютъ различны.

Во всякомъ случаѣ термодинамическая степень полезнаго дѣйствія также не даетъ полной мѣры экономичности машины, такъ какъ при увеличеніи вакуума выше опредѣленнаго предѣла (85—90%) экономичность машины увеличивается только весьма мало. Индикаторная работа возрастаетъ далеко не въ той же мѣрѣ, какъ располагаемая[1]), поэтому можетъ случиться, что одна и та же машина при высокомъ вакуумѣ даетъ худшій коэффиціентъ достоинства, чѣмъ при низкомъ, что представляетъ собою противорѣчіе.

Машины безъ конденсаціи даютъ лучшую термодинамическую степень полезнаго дѣйствія, чѣмъ машины съ конденсаціей, такъ какъ при первыхъ вслѣдствіе меньшаго паденія температуры получаются меньшія потери отъ обмѣна теплоты. Кромѣ того, у машины безъ конденсаціи потери отъ несовершеннаго расширенія меньше, чѣмъ у машины съ конденсаціей. Если первыя работаютъ съ заостреніемъ діаграммы, то потери отъ несовершеннаго расширенія вообще отпадаютъ.

Термодинамическая степень полезнаго дѣйствія машины съ перегрѣтымъ паромъ, отнесенная къ нормальной индикаторной мощности, можетъ быть принята равной:

Для одноцилиндровыхъ машинъ безъ конденсаціи 75-85%
Для машинъ съ противодавленіемъ, въ зависимости отъ величины послѣдняго 85-92%

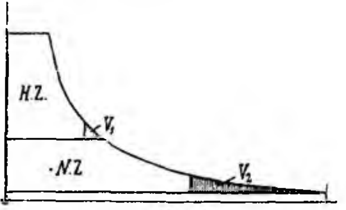
---

[1]) Ср. гл. 26, а также томъ II гл. 39.

Для одноцилиндровыхъ машинъ съ конденсаціей	50—60%
Для прямоточныхъ машинъ.	60—75%
Для кампаундъ-машинъ съ конденсаціей . . .	60—80%

Меньшія значенія служатъ для небольшихъ машинъ, а большія — для крупныхъ. У небольшихъ машинъ поверхности бываютъ сравнительно больше и вслѣдствіе этого получаются большія потери отъ обмѣна теплоты, неплотностей и лучеиспусканія.

Вышеприведенныя значенія служатъ для пара съ давленіемъ 12 маном. атм. и температуры 300° С. При меньшемъ давленіи и меньшемъ перегрѣвѣ получаются меньшія значенія степени полезнаго дѣйствія. При работѣ насыщеннымъ паромъ получаются значенія ниже на 5—10%.



Фиг. 58. Потери V_1 и V_2 отъ несовершеннаго расширенія въ цилиндрахъ машинъ двойного расширенія.

Относительно машинъ - компаундъ слѣдуетъ замѣтить, что цилиндръ высокаго давленія выгоднѣе работаетъ, нежели цилиндръ низкаго давленія. Хотя въ послѣднемъ потери отъ обмѣна теплоты бываютъ нѣсколько меньше вслѣдствіе меньшаго паденія теплоты, но, съ другой стороны, въ цилиндрѣ высокаго давленія происходитъ очень малая потеря отъ несовершеннаго расширенія (ср. фиг. 58). Относительно термодинамической степени полезнаго дѣйствія цилиндръ высокаго давленія соотвѣтствуетъ одноцилиндровой машинѣ безъ конденсаціи, а цилиндръ низкаго давленія — одноцилиндровой машинѣ съ конденсаціей.

Въ то время какъ термодинамическая степень полезнаго дѣйствія самыхъ совершенныхъ машинъ-компаундъ

составляетъ 80%, термическая степень полезнаго дѣйствія ихъ едва 20—21% (ср. соображенія относительно машинъ безъ потери въ гл. 27).

Въ общемъ та машина будетъ совершеннѣе, которая при опредѣленной температурѣ пара допускаетъ наименьшее наполненіе, или иначе говоря, лучшую термодинамическую и механическую степень полезн. дѣйствія даетъ та машина, въ которой достигается минимальный расходъ пара при наименьшемъ конечномъ давленіи расширенія.

40. Экономическая степень полезн. дѣйствія. Расходъ пара.

Для практической оцѣнки паровой машины руководящее значеніе имѣетъ общая или экономическая степень полезнаго дѣйствія котельной и машинной установки совокупно. При локомобиляхъ уже достигли 17,3%, соотвѣтственно расходу угля 0,5 кгр. на 1 лош. силу-часъ. Для постоянныхъ установокъ общая степень полезнаго дѣйствія меньше, чѣмъ для локомобилей, въ виду потери въ трубопроводахъ; этому содѣйствуетъ еще и то обстоятельство, что потери отъ лучеиспусканія и обмѣна теплоты нѣсколько больше, нежели у локомобилей, цилиндры которыхъ нагрѣваются излученной отъ котла теплотой.

Что касается расхода пара, то онъ опредѣляется лишь путемъ опыта. Вычисленный по индикаторной діаграммѣ на основаніи наполненія расходъ пара не соотвѣтствуетъ дѣйствительному расходу, который бываетъ значительно больше вслѣдствіе обмѣна теплоты и потерь отъ неплотностей.

При машинахъ съ насыщеннымъ паромъ излишекъ расхода пара иногда бываетъ 100% и болѣе; при перегрѣтомъ парѣ этотъ перерасходъ немного меньше.

Вслѣдствіе перегрѣва пара расходъ его сталъ менѣе зависимъ отъ размѣровъ машины. Доказано, что достигаемая путемъ перегрѣва экономія въ расходѣ пара уменьшается съ увеличеніемъ мощности машины и числа цилиндровъ. Кромѣ того путемъ перегрѣва уменьшается вліяніе нагрузи на расходъ пара.

При небольшихъ машинахъ расходъ пара больше по той причинѣ, что механич. степень полезн. дѣйствія нѣсколько ниже и что потери отъ неплотностей, обмѣна теплоты и лучеиспусканія въ ней бываютъ относительно больше (Ср. гл. 39). Расходъ пара обыкновенно относится къ лош. силѣ-часу, особенно для большихъ машинъ, гдѣ опредѣленіе полезной мощности путемъ торможенія невозможно[1]).

Для возможности сравненія расхода пара разныхъ машинъ между собой и съ машинами для насыщенного пара необходимо его привести къ одинаковому содержанію теплоты. Это производится такимъ образомъ, что расходъ пара для машины съ перегрѣтымъ паромъ умножаютъ на дробь, числитель которой есть содержаніе теплоты въ перегрѣтомъ парѣ, а знаменатель содержаніе теплоты въ насыщенномъ парѣ того же давленія. Безъ этого приведенія машина съ перегрѣтымъ паромъ кажется слишкомъ выгодной въ сравненіи съ машиной, работающей насыщеннымъ паромъ, и тѣмъ болѣе выгодной, чѣмъ болѣе паръ перегрѣтъ.

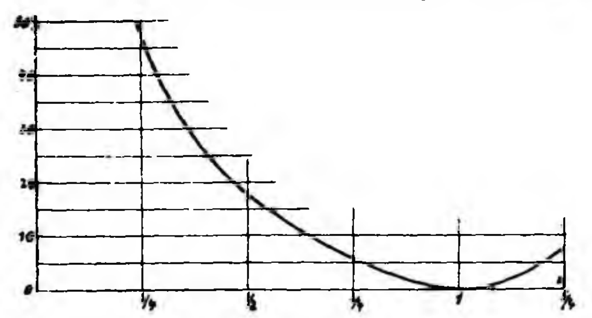
Если термодинамическая степень полезнаго дѣйствія для какой нибудь системы машинъ извѣстна, расходъ пара можетъ быть опредѣленъ путемъ вычисленія. Способъ этотъ примѣняется въ тѣхъ случаяхъ, когда требуется

---

[1]) Въ § 16 *правилъ ясно сказано*, что данныя относительно расхода пара, если никакихъ указаній не сдѣлано, всегда относятъ къ индикаторной мощности.

дать гарантію для непостроенной еще машины той же величины и для тѣхъ же условій работы. Въ этомъ случаѣ опредѣляютъ расходъ пара согласно гл. 27 для идеальной машины, работающей въ тѣхъ же предѣлахъ давленій и температуръ, и дѣлятъ его на термодинамическую степень полезнаго дѣйствія.

Слѣдующій примѣръ и нижеприведенныя соображенія относительно расхода пара машинъ съ противодавленіемъ



Фиг. 59. Среднее процентное приращеніе расхода пара на лош. силучасъ для отчасти нагруженныхъ постоянныхъ машинъ при постоянномъ давленіи (12 ман. атм.) и постоянной температурѣ (300° С.)

см. главу 42. Согласно діаграммы фиг. 59 лишній расходъ пара при нагрузкѣ въ 3/4 составляетъ 5—7%, при 1/2-ой нагрузкѣ 15—20%, при нагрузкѣ въ 1/4 около 45—50%. При перегрузкѣ на 25% расходъ пара увеличивается только на 7—9%.

Примѣръ: Какой можно гарантировать расходъ пара для нормальной машины компаундъ въ 200 дѣйств. лош. силъ, если свѣжій паръ передъ машиной имѣетъ давленіе въ 12 маном. атм. и 300° С. Вакуумъ въ конденсаторѣ составляетъ 90%. Какъ видно изъ діаграммы JS, адіабатическое паденіе теплоты составляетъ 198,7 калор.

Поэтому расходъ пара въ идеальной машинѣ составляетъ $\frac{632,3}{198,7} = 3,18$ кгр. Принимая термодинамическую степень полезн. дѣйствія машины въ 65%, найдемъ расходъ пара на индикаторную лош. силу-часъ 3,18 : 0,65 = 4,9 кгр.

Вычисленіе расхода пара на основаніи термодинамической степени полезн. дѣйствія уже существующихъ машинъ производится при предположеніи приблизительно одинаковыхъ условій давленій и температуры. При большихъ же отклоненіяхъ согласно гл. 27 примѣру III необходимо принять въ расчетъ измѣненіе величины термодинамической степени полезнаго дѣйствія.

41. Результаты опытовъ.

Ниже приведены нѣкоторые результаты изъ цѣлаго ряда опытовъ надъ машинами, работающими съ перегрѣтымъ паромъ и конденсаціей.

1. Въ концѣ 1909 года авторъ производилъ пріемныя испытанія на городской электрической станціи въ Bayreuth'ѣ надъ двумя горизонтальными машинами-тандэмъ съ впрыскивающей конденсаціей и перегрѣтымъ паромъ системы Ленца. Машины построены машиностроительнымъ заводомъ Аугсбургъ-Нюрнбургъ при 150 оборотовъ въ минуту, нормально развивали 250 дѣйств. лош. с. и временно максимально 335 лош. с. Діаметры цилиндровъ были 400 и 650 мм., ходъ поршня 550 мм., а діаметръ поршневого штока 90 мм. Штокъ въ цилиндрѣ высокаго давленія не проходилъ сквозь обѣ крышки. Нагрузка машинъ производилась электрическимъ путемъ при помощи регулируемаго водяного реостата. При опытахъ получено:

Продолжительность опыта	8 час.
Температура питательной воды передъ экономейзеромъ	23,8° C.
Манометрическое давленіе въ котлѣ . .	12,3 атм.
Начальное давленіе (манометрическое) въ цилиндрѣ	12,04 атм.

Потеря давленія отъ котла до цилиндра	0,26 атм.
Температура пара за перегрѣвателемъ .	316° С.
Температура пара передъ машиной . . .	287,3° С.
Паденія температуры отъ котла до машины	28,7° С.
Среднее наполненіе цилиндра высокаго давленія	25,48%
Давленіе въ конденсаторѣ (абсолютное) .	0,058 атм.
Температура впрыскиваемой воды . . .	6,5° С.
Давленіе выпуска въ цилиндрѣ низкаго давленія (абсол.)	0,139 атм.
Давленіе въ концѣ расширенія въ цилиндрѣ низкаго давленія (абсол.) . . .	0,728 атм.
Среднее число оборотовъ въ минуту . .	151,1
Мощность динамо (измѣренная точными инструментами)	208,2 килов.
Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія динамо	91,3%
Полезная мощность паровой машины . .	309,8 л. с.
Полный расходъ пара	12705 кгр.
Расходъ пара на дѣйств. лош. силу-часъ	5,12 кгр.
Общее количество теплоты на 1 килогр. пара передъ машиной соотвѣтственно температурѣ питательной воды 0° С. .	722,5 калор.
Расходъ теплоты на 1 дѣйств. л. с.-часъ	3699,2 калор.
Эффективная степень доброкачественности $\eta_g = \frac{632,3}{5,12 \cdot 210} =$	59%
Эффективный термическій коэффиціентъ машины $\eta_e = \frac{632,3}{3699,2} =$	17,1%

Общій коэффиціентъ полезнаго дѣйствія машины и котельной установки получится, если послѣднее число умножить на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія котельной установки (80,9%) и паропроводовъ (98,1%). Тогда использованіе теплоты угля получается около 13,6% соотвѣтственно температурѣ питательной воды 0° С. Принимая же во вниманіе температуру питательной воды 28,8° С находимъ 14%.

II. Въ началѣ 1910 года на городской электрической станціи въ Ашафенбургѣ авторъ производилъ пріемныя испытанія машины тандэмъ съ перегрѣтымъ паромъ, си-

стемы Куна съ парораспредѣленіемъ Кухенбекера и вспрыскивающимъ конденсаторомъ. Нормальная мощность машины при 125 оборотахъ и 20% наполненія составляла 400 дѣйств. лош. силъ, а максимальная при 30% наполненія 500 дѣйствит. лош. силъ[1]). Діаметры цилиндровъ составляли 411 и 700,5 мм., ходъ поршня 840 мм. и діаметръ поршневого штока 100 мм. Въ цилиндрѣ высокаго давленія штокъ не проходилъ насквозь. Торможеніе производилось электрическимъ путемъ помощью регулирующаго водяного реостата. *Получились слѣдующіе результаты:*

Продолжительность испытанія	8 час.
Температура питательной воды	39,4° С.
Среднее манометрич. давленіе въ котлѣ .	11,7 атм.
Среднее манометр. давленіе передъ машиной	11,38 атм.
Паденіе давленія отъ котла до машины .	0,32 „
Средняя температура пара передъ машиной	290,5° С.
Среднее наполненіе въ цилиндрѣ высокаго давленія.	25,20%
Конечное давленіе расширенія въ цилиндрѣ *низкаго давленія (абсолют.)*.	0,73 атм.
Температура вспрыскиваемой воды . . .	ок. 6° С.
Давленіе въ конденсаторѣ (абсолют.) . .	0,066 атм.
Давленіе впуска въ цилиндрѣ низкаго давленія (абсолют.)[1])	0,167 атм.
Среднее число оборотовъ въ минуту . .	125
Мощность динамо (измѣренная точными инструментами)	279,4 килов.
Коэффиціентъ полезнаго дѣйствія динамо (измѣренный)	91%
Полезная мощность паровой машины . .	417,16 л. с.
Индикаторная мощность паровой машины	453,19 л. с.
Механическій коэффиціентъ полезнаго дѣйствія	92%

[1]) Приведенныя здѣсь наполненія относятся къ точкѣ пересѣченія касательныхъ къ кривымъ впуска и расширенія. При испытаніи наполненія опредѣлялись относительно *закрытія клапана*.

Машина	Размѣры цилиндра мм.	Штокъ мм.	Отнош. объем. цил.	Мощность въ лош. с. N_i	Мощность въ лош. с. N_e	Числ. обор. n	Наполненіе ЦВД	Наполненіе ЦНД	Давленіе въ абсол. атм. p	p_e	p_1	p'	t	D_e	Эффект. коэфф. η_g
65 лош. с. локомоб. комп.	170,3/300 400	45/0 45/0	3,179	61,6	52,1	210	28,8	47,1	13,1	0,74	0,24	0,08	315,0	6,36	47,6
Одноцил нар. маш. 80 л. с.	325 550	65/0	—	88,7	81,1	150,4	6,38	—	11,7	1,41	0,33	0,102	270,8	7,84	42,8
тоже	тоже	тоже	—	114,5	108,5	150,5	12,95	—	11,2	1,72	0,38	0,103	283,4	7,11	46,8
Локом. комп. 120 лош. сил.	262/452,5 480	55/0 55/0	3,027	136,3	121,8	169,3	26,2	64,5	13,0	0,86	0,28	0,166	334,0	5,43	61,1
150 лош. сил. маш. тандэмъ	301/505,5 680	75/0 75/75	2,847	181,4	157,8	123,6	17,3	31,0	12,3	0,65	0,147	0,062	297,0	5,70	53,0
тоже	тоже	тоже	тоже	239,3	215,4	127,6	33,3	30,8	12,2	0,99	0,52	0,077	284,6	5,88	53,6
250 лош. сил. маш. тандэмъ	400/650 550	90/0 90/90	2,657	—	260,5	151,2	18,97	39,6	12,7	0,57	0,125	0,048	272,4	5,22	57,3

Общій расходъ пара (за вычетомъ сгущенія въ паропроводахъ).	17 465 калор.
Расходъ пара на дѣйств. лошад. силучасъ	5,23 кгр.
Общее содержаніе теплоты 1 кгр. пара передъ машиной, отнесенное къ температурѣ питат. воды 0° С.	724,5 калор.
Расходъ теплоты на 1 дѣйствит. лош. силу-часъ, отнесенный къ температурѣ питательной воды въ 0° С.	3789,1 калор.
Эффективный коэффиціентъ полезнаго дѣйствія $\eta_g = \frac{632,3}{5,23 \cdot 201,5}$	60%
Эффективный термическій коэффиціентъ полезнаго дѣйствія $\eta_e = \frac{632,3}{3789,1}$	16,7%

Для полученія степени использованія теплоты топлива необходимо полученное выше число умножить на коэффиц. полезнаго дѣйствія котла и трубопроводовъ.

III. Цѣлый рядъ дальнѣйшихъ опытовъ данъ на приведенной здѣсь таблицѣ. Всѣ машины работали съ прегрѣтымъ паромъ и съ конденсаціей. Обозначенія отдѣльныхъ буквъ даны въ гл. 4. t обозначаетъ температуру пара передъ машиной, а p опредѣленное по индикаторной діаграммѣ начальное давленіе въ цилиндрѣ высокаго давленія. Наполненія, какъ и при изслѣдованіяхъ 1 и 2 отнесены къ положенію поршня, при которомъ закрывается паровпускной органъ (точка перегиба въ индикаторной діаграммѣ), p_e - - давленіе пара въ моментъ предваренія выпуска.

VII. Использованіе мятаго пара[1]).

42. Отопленіе мятымъ паромъ.

Теплота, содержащаяся въ мятомъ нарѣ машины, меньше содержанія теплоты въ свѣжемъ парѣ на тепловую величину индикаторной работы и на потерю отъ лучеиспус-

---

[1]) Ср. также гл. 57—59 во II томѣ.

канія. Какъ видно изъ слѣдующаго примѣра, въ отработанномъ парѣ содержится еще большая часть теплоты свѣжаго пара. Отсюда слѣдуетъ, что весьма раціонально использовать содержащуюся въ мятомъ парѣ теплоту для цѣлей отопленія и т. п. Если для отопленія требуется только часть отработавшаго пара, наприм. четвертая часть или еще меньше, то можетъ оказаться выгоднѣе работать съ конденсаторомъ, а паръ для отопленія брать непосредственно изъ котла, если не предпочитаютъ пользоваться паромъ изъ ресивера. Болѣе подробно объ этомъ въ главахъ 43 и 44. Въ послѣдней главѣ путемъ примѣровъ выяснено, что комбинированное развитіе силы и теплоты экономнѣе, нежели работа съ конденсаціей и отдѣльнымъ производителемъ пара для отопленія.

Вышеприведенныя разсужденія относятся главнымъ образомъ къ машинамъ безъ конденсаціи и соотвѣтственно съ противодавленіемъ. Можно однако использовать мятый паръ и машинъ съ конденсаціей для цѣлей отопленія, напр. для приготовленія теплой воды на пивоваренныхъ заводахъ, баняхъ и т. д. При этомъ достигаются температуры воды въ 40—50⁰ С. въ зависимости отъ вакуума, между тѣмъ какъ у машинъ безъ конденсаціи достигаютъ температуры около 90⁰ С.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда только часть мятаго пара находитъ себѣ примѣненіе, при крупныхъ установкахъ иногда раціонально установить двѣ машины, изъ которыхъ одна работаетъ безъ конденсаціи и идетъ для цѣлей отопленія, а другая съ конденсаціей исключительно для двигательныхъ цѣлей.

Примѣръ 1. Пусть паровая машина при работѣ съ конденсаціей расходуетъ 6,2 кгр. пара съ давленіемъ 12 маномет. атм. и 300⁰ С., а безъ конденсаціи 7 кгр. на

каждую индикаторную лош. силу-часъ. Какой получается въ обоихъ случаяхъ расходъ теплоты на индикаторную лошад. силу-часъ, если допустить, что при работѣ безъ конденсаціи мятый паръ идетъ для отопленія.

Отвѣтъ: Содержаніе теплоты перегрѣтаго пара съ давленіемъ 13 абсол. атм. и 300° С. согласно энтропійной таблицѣ составляетъ 728,5 калор. Поэтому при температурѣ питательной воды 50° С. теплота парообразованія на 1 кгр. пара составляетъ 678,5 калор. Отсюда расходъ теплоты на индикаторн. лош. силу-часъ при работѣ съ конденсаціей получится 678,5 × 6,2 = 4200 калорій.

При работѣ безъ конденсаціи расходъ пара на индикатор. лош. силу-часъ опредѣляется разностью содержанія теплоты во впускаемомъ и выпускаемомъ парѣ, причемъ принято, что весь мятый паръ употребляется для отопленія. Содержаніе теплоты въ мятомъ парѣ согласно вышесказаннаго меньше содержанія теплоты въ свѣжемъ парѣ на количество теплоты, превращенною въ индикаторную работу (632,3 калор.) и на потерю отъ лучеиспусканія. Если принять отдачу теплоты на индикат. лош. силу-часъ включая и потерю на лучеиспусканіе равной въ круглыхъ числахъ 700 калор., то на каждый кгр. пара расходуется въ машинѣ для образованія работы 700 : 7 = 100 калор., такъ что мятый паръ содержитъ еще 728,5—100 = 628,5 калор. т. е. въ мятомъ парѣ заключается еще большая часть теплоты свѣжаго пара.

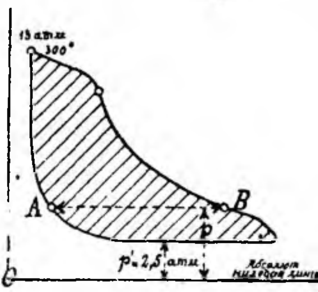
Въ разсмотрѣнномъ примѣрѣ принято, что давленіе мятаго пара только немного выше атмосфернаго. Если противодавленіе больше, тогда, какъ видно изъ діаграммы *JS*, полезное паденіе теплоты бываетъ соотвѣтственно меньше. Съ этимъ связано увеличеніе расхода пара, какъ видно изъ слѣдующаго примѣра. Однако это увеличеніе расхода пара не имѣетъ никакого значенія, если мятый паръ примѣняется для цѣлей отопленія.

Примѣръ 2. Пусть одноцилиндровая машина въ 100 дѣйствит. лошад. силъ работаетъ паромъ съ 12 манам. атм. и 300° С. Машина работаетъ въ связи съ установкой для отопленія, при чемъ давленіе выходящаго изъ машины

или соотвѣтственно идущаго на отопленіе пара составляет 2,5 абс. атм. Какой получается расходъ пара на дѣйст вит. лошад. силу-часъ?

Отвѣтъ: Приблизительно расходъ пара опредѣляетс изъ діаграммы JS. Адіабатическое паденіе теплоты дл данныхъ предѣловъ паденія давленія составляетъ 84 калор: Принявъ термодинамическую степень полезнаго дѣйствія машины въ 80%, находимъ расходъ пара на индикат. лош. силу-часъ $D_i = \frac{632{,}3}{84 \cdot 0{,}8} = 9{,}4$ кгр.

Если механическая степень полезн. дѣйствія составляетъ 90%, то расходъ пара на дѣйствит. лошад. силучасъ будетъ $D_e = \frac{9{,}4}{0{,}9} = 10{,}4$ кгр. Расходъ пара такимъ образомъ гораздо больше, нежели въ машинѣ безъ конденсаціи.



Фиг. 60. Индикаторная діаграмма машины съ противодавленіемъ (пусть $p_1 \cong 2{,}6$ атм. вмѣсто $p' = 2{,}5$ атм.

Если кромѣ расхода пара требуется еще опредѣлить объемъ, описываемый поршнемъ, то поступаютъ слѣдующимъ образомъ: строятъ индикаторную діаграмму (фиг. 60) для нормальной нагрузки машины и путемъ ея планиметрированія опредѣляютъ среднее индикаторное давленіе p_i и вмѣстѣ съ тѣмъ и объемъ, описываемый поршнемъ[1]). Черезъ точку B кривой расширенія проводятъ горизонталь BA, и расходъ пара на индикат. лошад. силу-часъ получится

$$D_i = \frac{27 \cdot l}{p^i\, x \cdot v''}$$

[1]) Ср. главу 8 тома II.

Здѣсь $l = AB:5$ обозначаетъ длину діаграммы, соотвѣтствующую количеству впущеннаго пара и выраженную въ доляхъ хода поршну; v'' означаетъ удѣльный объемъ сухого насыщеннаго пара давленія p и x — относительное количество пара для состоянія, соотвѣтствующаго точкѣ B.

Послѣднее можетъ быть опредѣлено приблизительно помощью діаграммы JS. Болѣе точныя исходныя точки для выбора значенія x даютъ изслѣдованія Эберле[1]. Такъ какъ при этихъ опытахъ значенія x опредѣлялись въ концѣ расширенія, то обыкновенно рекомендуется принимать точку B по возможности ближе къ концу расширенія. Во всякомъ случаѣ точка B должна быть выбрана такъ, чтобы точка A лежала на кривой сжатія.

Послѣднее уравненіе предполагаетъ, что относительное количество пара при A такое же, какъ и въ B.

43. Отопленіе промежуточнымъ паромъ.

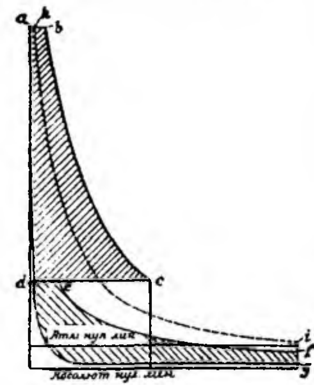
Отопленіе промежуточнымъ паромъ примѣняется только при крупныхъ машинахъ съ двукратнымъ или многократнымъ расширеніемъ. Оно должно предпочитаться отопленію отработаннымъ паромъ, если только часть мятаго пара машины употребляется для цѣлей отопленія т. е. когда паръ для отопленія требуется только временами. Заимствованіе пара производится изъ ресивера, который долженъ быть снабженъ приспособленіемъ для поддерживанія въ немъ постояннаго давленія (гл. 59 томъ II).

Вслѣдствіе заимствованія пара изъ ресивера наполненіе цилиндра низкаго давленія уменьшается т. е. необ-

---

[1]) См. Z. d. V. d. J. 1907 стр. 2005.

ходимо работать съ относительно большимъ наполненіемъ цилиндра высокаго давленія. Распредѣленіе пара происходитъ здѣсь такъ, какъ показано на фиг. 61. Наполненіе цилиндра низкаго давленія вмѣсто *d c* составляетъ только *d e* т. е. заимствованное для надобностей отопленія изъ ресивера количество пара изображается отрѣзнымъ *e c*. Безъ заимствованія пара изъ ресивера получилась бы кривая расширенія *h i*, между тѣмъ какъ въ дѣйствительности получаются кривыя расширенія *b c* и *e f*.



Фиг. 61. Теоретическая индикаторная діаграмма машины двойного расширенія съ заимствованіемъ ресивернаго пара.

Чѣмъ больше заимствуется промежуточнаго пара, тѣмъ больше бываетъ мощность цилиндра высокаго давленія, пока наконецъ при заимствованіи изъ ресивера 100% пара въ цилиндръ низкаго давленія паръ вообще не поступаетъ. Машина тогда работаетъ, какъ одноцилиндровая съ противодавленіемъ, а цилиндръ низкаго давленія работаетъ въ холостую, что, понятно, не экономично. Поэтому заимствованіе пара изъ ресивера не должно простираться до такихъ предѣловъ.

Если потребность въ парѣ для отопленія временно превосходитъ то количество, которое можетъ быть заимствовано изъ машины, то слѣдуетъ позаботиться объ автоматическомъ прибавленіи свѣжаго пара.

Въ зависимости отъ требуемаго давленія, а слѣдовательно и температуры пара для отопленія, работа должна производиться съ давленіемъ въ ресиверѣ отъ 1,5 – 4 абс. атм.

Такъ какъ вслѣдствіе меньшаго наполненія цилиндра низкаго давленія объемъ описываемый его поршнемъ можетъ быть выбранъ меньшимъ, то при заимствованіи промежуточнаго пара получается меньшее отношеніе объемовъ цилиндровъ. Въ то время какъ обыкновенно это отношеніе составляетъ 1:2,5—1:3, здѣсь оно въ зависимости отъ степени заимствованія уменьшается до 1 : 2, а при постоянномъ очень большомъ заимствованіи даже до 1 : 1,5.

Работа безъ конденсаціи можетъ, напр., примѣняться на химическихъ заводахъ, гдѣ часть пара для отопленія должно имѣть болѣе высокое давленіе, нежели выпускаемый паръ.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда требуется только немного пара высокаго давленія, иногда оказывается болѣе раціональнымъ брать его прямо изъ котла и установить обыкновенную одноцилиндровую машину безъ охлажденія съ использованіемъ мятаго пара для цѣлей отопленія.

Отопленіе ресиверным паромъ даетъ тѣ же экономическія преимущества, что и отопленіе мятымъ паромъ, такъ какъ заимствованный изъ ресивера паръ предварительно совершилъ уже нѣкоторую работу въ цилиндрѣ высокаго давленія. Послѣдній до нѣкоторой степени служитъ редукціоннымъ вентилемъ для пониженія давленія пара до желаемаго предѣла. Такъ какъ въ поршневыхъ машинахъ въ противоположность паровымъ турбинамъ наиболѣе выгодное дѣйствіе получается отъ части высокаго давленія, то развитіе работы въ цилиндрѣ высокаго давленія происходитъ при меньшей затратѣ теплоты.

Цилиндръ низкаго давленія при заимствованіи ресивернаго пара обыкновенно работаетъ съ конденсаціей. При этомъ содержащаяся въ парѣ конденсатора теплота можетъ быть использована для нагрѣванія воды или воздуха.

Для возможности опредѣленія сбереженія теплоты достигаемаго при опредѣленной работѣ машины путемъ заимствованія ресивернаго пара слѣдуетъ опредѣлить количество теплоты W доставленной машинѣ въ часъ, количество отданной ею теплоты $W_н$ съ ресивернымъ паромъ. Использованное въ машинѣ въ часъ количество теплоты W_m тогда состоитъ

$$W_m = W - W_н .$$

Если часовой расходъ теплоты въ машинѣ съ конденсаціей при чистой силовой эксплоатаціи составляетъ W_1, то получаемая путемъ заимствованія ресивернаго пара экономія теплоты въ процентахъ составитъ

$$\frac{W_1 - W_m}{W_1} \cdot 100\%.$$

Въ зависимости отъ количества заимствуемаго ресивернаго пара и отъ давленія въ ресиверѣ, расходъ теплоты машиной можетъ уменьшиться на $\sim$ 55%. Впрочемъ экономія теплоты около 55% получается только при большомъ потребленіи ресивернаго пара и при благопріятныхъ отношеніяхъ между давленіями свѣжаго и ресивернаго пара.

Сбереженіе топлива меньше сбереженія теплоты въ машинѣ, такъ какъ здѣсь слѣдуетъ принимать въ расчетъ все количество доставленной машинѣ теплоты. Если сперва примемъ, что паръ для отопленія получается отдѣльно, то

часовой расходъ теплоты машиной . . . . . . W_1
часовая потребность въ теплотѣ для отопленія $W_н$

Всего $W_1 + W_н$

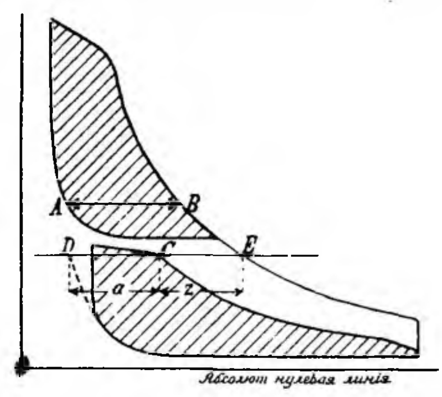
Если опять W представляетъ доставленное машинѣ съ заимствованіемъ ресивернаго пара въ часъ количество

теплоты, то процентное сбереженіе топлива получается

$$\frac{(W_1 + W_н - W}{W_1 + W_н} \cdot 100\%.$$

Здѣсь достигаютъ значенія 25—33%. Впрочемъ сбереженіе въ 33% получается лишь при большомъ потребленіи ресивернаго пара.

При вычисленіи расхода пара для опредѣленной мощности машины при заимствованіи ресивернаго пара можно и здѣсь примѣнять указаннымъ на примѣрѣ II гл. 42 способомъ для каждаго цилиндра отдѣльно; при этомъ для правильной оцѣнки термодинамической степени полезнаго дѣйствія цилиндровъ высокаго и низкаго давленій необходимо начертить индикаторную діаграмму.



Фиг. 62. Дѣйствительная діаграмма машины двойного расширенія съ заимствованіемъ ресивернаго пара для отопленія (послѣднее при отсутствіи потерь при переходѣ пара измѣрялась-бы отрѣзкомъ z).

Такъ какъ обыкновенно вопросъ идетъ объ опредѣленіи расхода пара для разныхъ мощностей и заимствуемыхъ количествъ пара, то поступаютъ слѣдующимъ образомъ: чертятъ діаграммы цилиндра высокаго давленія для разныхъ наполненій, напр. 30, 40 и 50%, и для раз-

ныхъ заимствованій, напр. 40, 60 и 80% общаго разхода пара, вычисляютъ соотвѣтствующія наполненія „a“ цилиндра низкаго давленія изъ уравненія (фиг. 62)

$$a = \frac{(1-e) \cdot l \cdot \gamma_H \cdot x_N}{m \cdot x_H \cdot \gamma_N}.$$

Тогда могутъ быть вычерчены соотвѣтственныя діаграммы цилиндра низкаго дявленія. При этомъ слѣдуетъ замѣтить что, строго говоря, величина a представляетъ собой не наполненіе, а вѣсъ доставленнаго пара.

Въ послѣднемъ уравненіи обозначаютъ: „m“ отношеніе объемовъ цилиндровъ, e отношеніе количества заимствованнаго пара ко всему количеству впущеннаго въ цилиндръ высокаго давленія пара, $l = AB:s$ соотвѣтствующую доставленному количеству теплоты длину діаграммы высокаго давленія въ доляхъ хода поршня; γ_H и γ_N удѣльные вѣса сухого насыщеннаго пара въ цилиндрахъ высокаго и низкаго давленій въ точкахъ діаграммы B и C, x_H и x_N относительныя количесгва пара въ соотвѣтственныхъ точкахъ B и C.

Исходными точками для опредѣленія x_H и x_N могутъ служить упомянутыя въ послѣдней главѣ изслѣдованія Эберле.

Пусть при планиметрированіи соотвѣтственныхъ діаграммъ получается для каждой пары діаграммъ соотвѣтственное значеніе p_i. Нормальное значеніе p_i выбирается такъ, чтобы при этомъ получились возможно выгодныя діаграммы. По этому значенію p_i и поданной мощности машины изъ уравненія

$$N_i = \frac{F \cdot s \cdot n}{30 \cdot 75} \cdot p_i$$

вычисляются размѣры цилиндровъ (см. томъ II гл. 14).

Принимая извѣстную механическую степень полезнаго дѣйствія можно перейти къ полезной мощности.

Расходъ пара на 1 индикат. лошад. силу-часъ опредѣляется изъ зависимости

$$D_i = \frac{27 \cdot l}{m \cdot p_i \cdot x_H \cdot v_H},$$

гдѣ $x_H \cdot v_H$ удѣльный объемъ пара въ концѣ расширенія (точка B). Значеніемъ D_i опредѣляется непосредственно общій расходъ пара въ часъ, а также и временное заимствованіе изъ ресивера въ кгр. въ часъ.

Если нанести въ прямоугольной координатной системѣ процентныя заимствованія ресивернаго пара въ видѣ абсциссъ, а полезную работу, а также заимствованіе пара въ кгр. въ часъ въ видѣ ординатъ, то путемъ графической интерполяціи для предписанныхъ условій (полезной мощности и количества заимствованнаго пара въ часъ) получаются соотвѣтственныя значенія наполненія въ цилиндрахъ высокаго и низкаго давленій, а также D_i.

По найденному помощью уравненія

$$632{,}3(N_i' + N_i'') = D \cdot H' \cdot \eta'_g + (D - E)\, H'' \cdot \eta''_g$$

можно провѣрить правильность оцѣнки значеній x_H и x_N. Такъ, если для удовлетворенія этому уравненію требуются слишкомъ выгодные коэффиціенты η'_g и η''_g, предѣльныя значенія которыхъ, какъ извѣстно изъ опытовъ, не бываютъ выше 90 и 52%, то принятыя значенія x_H и x_N необходимо соотвѣтственно измѣнить и повторить вычисленіе.

Въ предыдущемъ уравненіи обозначаютъ: D расходъ пара въ кгр. въ часъ, H' и H'' адіабатическія паденія теплоты для цилиндровъ высокаго и низкаго давленій, E — заимствованіе ресивернаго пара въ кгр. въ часъ и η'_g и η''_g термодинамическія степени полезнаго дѣйствія цилиндровъ высокаго давленій.

Слѣдуетъ здѣсь замѣтить, что за нормальное p_i большею частью принимается то значеніе его, при которомъ діаграмма цилиндра высокаго давленія даетъ небольшое паденіе давленія или заостреніе. Если затѣмъ наполненіе цилиндра высокаго давленія уменьшается, то получается петля; если же оно, наоборотъ, увеличивается, то получается усиленное паденіе напряженія (ср. т. II, гл. 10 и 55).

44. Использованіе теплоты при примѣненіи мятаго пара.

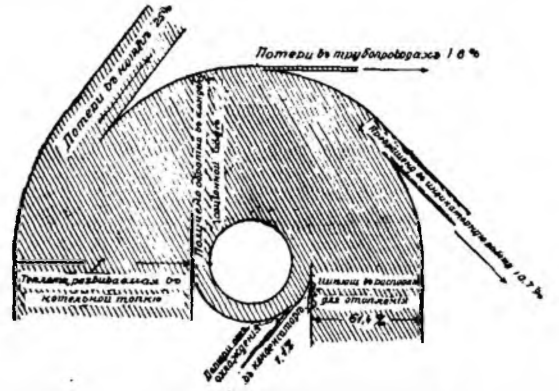
Примѣненіе пара машинъ для цѣлей отопленія, какъ выяснено въ гл. 42, влечетъ за собой замѣтное уменьшеніе расхода теплоты въ машинѣ. Одновременно же достигается лучшее использованіе теплоты топлива, какъ это выяснено цифрами въ нижеприведенныхъ примѣрахъ. Въ тѣхъ случаяхъ, когда кромѣ двигательной силы теплота употребляется еще для цѣлей отопленія или производства, слѣдуетъ всегда стремиться къ использованію всего отработаннаго пара для цѣлей отопленія, т. е. установка должна быть такъ сконструирована, чтобы образовалось отработаннаго пара не больше того, сколько можетъ употребляться производствомъ.

I. Тепловой балансъ одноцилиндровой машины въ 200 инд. лош. с. безъ конденсаціи и съ использованіемъ мятаго пара.

Принимая давленіе и температуру пара передъ машиной 10 маном. атм. и 300° C, а давленіе выпуска изъ машины или давленіе впуска въ трубопроводъ для отопленія 0,1 маном. атм., находимъ расходъ пара на индик. лошад. силу-часъ около 7,5 кгр. Допуская степень полезнаго дѣйствія котельной установки 75% и принимая давленіе и температуру пара въ котлѣ 10,5 маном. атм. и 330° C, температуру конденсата, вытекающаго изъ

отопленія въ 100⁰ С и наконецъ температуру при которой конденсатъ опять поступаетъ въ котелъ 90⁰ С, находимъ теплоту для образованія:

1 кгр. пара	655,8	калор.
Часовой расходъ пара	1 500	кгр.
Расходуемое количество теплоты въ часъ	1 311 600	калор.



Фиг. 63. Схема распредѣленія теплоты въ 200-силовой одноцилиндровой машинѣ безъ конденсаціи при использованіи мятаго пара.

Такимъ образомъ получается слѣдующій тепловой балансъ:

Потеря въ котлѣ	327 900	калор.	25,0%
Потеря въ трубопроводахъ . . .	24 000	калор.	1,8%
Использовано для работы . . .	140 000	калор.	10,7%
Располаг. для цѣлей отопленія .	804 700	калор.	61,4%
Потеря на охлажден. конденсата	15 000	калор.	1,1%
	1 311 600	калор.	100,0%

Это распредѣленіе теплоты графически изображено на фиг. 63. Слѣдуетъ замѣтить, что въ разсмотрѣнномъ балансѣ не принята во вниманіе потеря въ трубопроводахъ для отопленія. Поэтому въ дѣйствительности располагаемое для отопленія количество теплоты будетъ на 1—2% кгр. меньше вычисленнаго.

При углѣ съ теплотворной способностью въ 7500 калор. для полученія 1 311 600 калор. требуется 175 кгр. угля въ часъ.

II. Тепловой балансъ машины въ 200 индик. лош. с. съ коденсаціей и отопленіемъ свѣжимъ паромъ.

Пусть паръ въ котлѣ имѣетъ давленіе и температуру въ 10½ маном. атм. и 330° С, а передъ машиной 10 маном. атм. и 300° С. Давленіе выпуска пусть составляетъ 0,1 абсол. атм. соотвѣтственно вакууму въ 90%; расходъ пара пусть будетъ 5 кгр. на индик. лош. силу-часъ. Принимая степень полезн. дѣйствія котельной установки въ 75%, температуру питающаго котелъ конденсата машины 35° С и температуру конденсаціонной воды изъ сѣти отопленія въ 90° С находимъ для машины:

Теплота парообразованія на кгр. пара .	708,7	калор.
Расходъ пара въ часъ	1 000	кгр.
Расходуемое количество теплоты въ часъ	944 933	калор.

Отсюда тепловой балансъ будетъ слѣдующій:

Потеря въ котлѣ	236 233	калор.	25,0%
Потеря въ трубопроводахъ . .	16 000	калор.	1,7%
Израсходовано на работу . . .	140 000	калор.	14,8%
Отдано охлаждающей водѣ . .	542 100	калор.	57,4%
Потеря отъ охлажден. конденсата	10 600	калор.	1,1%
Всего	944 933	калор.	100,0%

Графическое изображеніе этого распредѣленія теплоты показано на фиг. 64.

При углѣ съ теплотворной способностью въ 7500 калор. для полученія исчисленнаго количества теплоты потреблено угля 126 кгр. въ часъ.

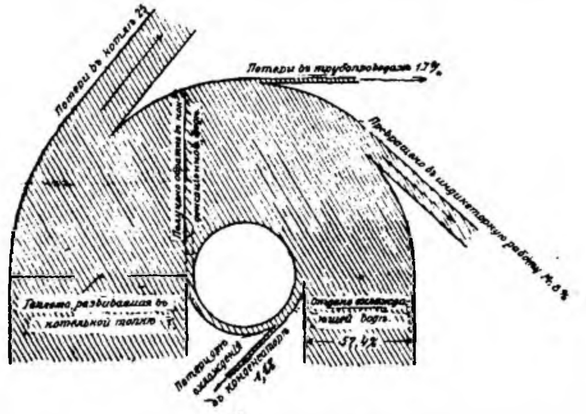
Такъ какъ для отопленія можно примѣнять еще и свѣжій паръ въ такомъ количествѣ, какъ въ прежнемъ примѣрѣ, то принявши всѣ потери въ 30%[1]) находимъ расходъ теплоты для отопленія 1 149 571 калор. и соотвѣтствующее количество угля 153 кгр. Такимъ образомъ при этомъ способѣ работы потребно угля:

---

[1]) Ср. въ этомъ отношеніи слѣдующій примѣръ.

Для цѣлей движенія	126	кгр.
Для отопленія	153	кгр.
Всего	279	кгр.

Излишній расходъ по сравненію съ машиной безъ конденсаціи составляетъ 104 кгр. въ часъ, т. е. 59,5%. При 3000 рабочихъ часахъ въ годъ и цѣнѣ угля въ 200 марокъ за двойной вагонъ (10 000 кгр.) эксплоатація машины съ конденсаціей съ отопленіемъ свѣжимъ паромъ



Фиг. 64. Схема распредѣленія теплоты въ 200-силовой машинѣ съ конденсаціей (безъ использованія мятаго пара).

вызываетъ увеличеніе расхода на 6240 марокъ. Сюда еще надо прибавить соотвѣтственный излишній расходъ на проценты и погашеніе вслѣдствіе большей стоимости установки.

Изъ вышеразсмотрѣннаго примѣра слѣдуетъ, что хотя одноцилиндровая машина безъ конденсаціи сама по себѣ расходуетъ больше пару, а слѣд. и угля, нежели машина съ конденсаціей, однако она оказывается экономичнѣе, если отработавшій паръ можетъ примѣняться для цѣлей отопленія. Во всякомъ случаѣ въ приведенныхъ примѣрахъ было принято, что весь мятый паръ для отопленія

употребляется въ теченіе всего года. Если же это не имѣетъ мѣста, то условіе для машины безъ конденсаціи будутъ менѣе выгодны, нежели въ предыдущемъ примѣрѣ. Начиная съ опредѣленнаго предѣла и ниже, машина съ конденсаціей и со свѣжимъ паромъ для отопленія будетъ работать экономичнѣе, чѣмъ машина безъ конденсаціи.

III. Отопленіе свѣжимъ или мятымъ паромъ при расходѣ энергіи въ 200 индик. лошад. силъ и расходѣ теплоты въ 200000 калор. въ часъ?

Такъ какъ здѣсь для цѣлей отопленія требуется всего 200000 калор. въ часъ, т. е. по примѣру I только $^1/_4$ всего количества теплоты, располагаемой при работѣ безъ конденсаціи, то сразу нельзя опредѣлить, выгоднѣе ли будетъ работа безъ конденсаціи съ отопленіемъ мятымъ паромъ, или же работа съ конденсаціей съ отопленіемъ свѣжимъ паромъ. Здѣсь необходимо путемъ вычисленія установить, какой способъ работы требуетъ меньшаго расхода пара или угля.

При работѣ безъ конденсаціи согласно примѣру I требуется въ часъ . . . . 1 311 600 калор.

При работѣ съ охлажденіемъ требуется для дѣйствія машины сообразно примѣру II . . . . 944 933 „
и еще свѣжаго пару для отопленія $\frac{200\,000}{0{,}7}$ = ... 285 714 „

Всего 1 230 647 калор.

Такимъ образомъ при работѣ съ конденсаціей и отдѣльнымъ приготовленіемъ пара для отопленія сберегается въ часъ 80 953 калор. и соотвѣтственно 10,8 кгр. каменнаго угля съ теплотворной способностью въ 7500 калор., при 3000 рабочихъ часахъ въ годъ и цѣнѣ угля 200 мар. за 10 000 кгр. въ годъ сберегается 648 марокъ.

Если же принять во вниманіе увеличеніе начальной стоимости установки конденсаціи, то это незначительное сбереженіе уравняется излишнимъ расходомъ на проценты и погашеніе. Такимъ образомъ для разсматриваемой потребности теплоты оба способа работы одинаково эконо-

мичны. При еще меньшемъ расходѣ пара на отопленіе работа съ конденсаціей и свѣжимъ паромъ для отопленія будетъ экономичнѣе.

Но работа съ конденсаціей можетъ оказываться выгоднѣе даже при большой потребности пара для отопленія, а именно тогда, если отопленіе производить ресивернымъ паромъ.

Вычисляя предыдущій примѣръ при допущеніи, что потребность теплоты покрывается заимствованіемъ ресивернаго пара, найдемъ, что сбереженіе угля при работѣ съ конденсаціей будетъ значительно больше.

VIII. Поршневая машина и турбина, работающая мятымъ паромъ.

45. Использованіе мятаго пара въ турбинахъ.

Въ горныхъ и горнозаводскихъ установкахъ большое число паровыхъ машинъ употребляется для перемежающейся работы прокатныхъ становъ, рудоподъемныхъ машинъ, молотовъ, ножницъ, прессовъ и т. д. Для использованія здѣсь преимуществъ работы съ конденсаціей, можно или всѣ мешины присоединить къ одной центральной конденсаціи, или использовать весь мятый паръ въ турбинѣ. Послѣднее во многихъ случаяхъ оказалось значительно выгоднѣе, такъ какъ паровая турбина, въ противоположность поршневой машинѣ, представляетъ собой желанную машину низкаго давленія. Въ турбинѣ происходитъ гораздо лучшее использованіе пара въ низшихъ областяхъ давленія, чѣмъ въ поршневой машинѣ. Въ то время, какъ обыкновенно послѣдняя можетъ использовать вакуумъ не выше 85—90%, въ паровой турбинѣ могутъ быть выгодно использованы вакуумы въ 95% и выше.

Изъ таблицы Моллье для пара видно, что паръ давленіемъ 1,1 абс. атм. при расширеніи до 0,05 абс. атм. даетъ почти такое же адіабатическое паденіе теплоты, какъ при расширеніи отъ 12 абс. атм. и 300° С до 11 абс. атм. Такимъ образомъ путемъ установки паровой турбины для мятаго пара можно почти удвоить мощность, получаемую отъ 1 кгр. пара.

Для достиженія равномѣрнаго притока рабочаго вещества къ турбинѣ необходимо включеніе особаго теплового аккумулятора между поршневой машиной и турбиной.

При этомъ установка должна быть расположена такъ, чтобы всякое противодавленіе у поршневой машины было бы устранено, чтобы изъ теплового аккумулятора не продувался бы паръ, и чтобы къ турбинѣ не притекалъ торможенный паръ.

Въ Америкѣ и Англіи не удовольствовались тѣмъ, чтобы машины съ перемѣнной нагрузкой соединяли съ турбинами для отработавшаго пара. Тамъ машины и съ равномѣрной нагрузкой вмѣсто непосредственнаго соединенія съ конденсаторами соединяются съ турбинами[1]). Поршневыя машины въ этомъ случаѣ могутъ быть устроены, какъ одноцилиндровыя машины вслѣдствіе чего и стоимость ихъ соотвѣтственно ниже. Однако общая стоимость подобной установки оказывается выше стоимости обыкновенной паровой машины.

[1]) См. Z. d. V. d. I. 1911 г. стр. 210.

Алфавитный указатель.